



**Universidad**  
Zaragoza



e s c u e l a  
p o l i t é c n i c a  
s u p e r i o r  
d e h u e s c a

# TRABAJO FIN DE GRADO

**“Dimensionado óptimo con EPANET de redes  
de riego a presión”**

AUTOR: Daniel Ruiz Beamonte

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural

DIRECTOR: Dr. César González Cebollada

FECHA: Noviembre de 2014



# ÍNDICE

0. RESUMEN .....	3
1. OBJETIVOS.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	8
2.1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.....	9
2.2 EL DIMENSIONADO DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN.....	11
2.3. EL PROGRAMA INFORMÁTICO EPANET. ....	21
2.4. EL MÓDULO WATERNETGEN DE DIMENSIONADO DE REDES. ....	28
3. METODOLOGÍA .....	34
3.1 RED DE PRUEBA.....	35
3.2 RED REAL.....	51
3.3 NUEVE REDES.....	86
4. RESULTADOS.....	99
4.1 RESULTADOS RED DE PRUEBA .....	100
4.2 RESULTADOS RED FONZ.....	103
4.3 RESULTADOS NUEVE REDES .....	106
5. DISCUSIÓN .....	111
6. CONCLUSIONES.....	115
7. BIBLIOGRAFÍA.....	118
8. ANEXOS .....	122

## 0. RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado ha consistido en la aplicación del módulo WaterNetGen del programa de cálculo hidráulico EPANET para el dimensionado de redes de riego a presión.

En primer lugar se realizará un estudio detallado de los fundamentos del dimensionado de redes de riego presurizadas y las distintas estrategias para abordarlo. Se estudiará a fondo el manejo del programa EPANET y de su módulo WaterNetGen destinado al dimensionado de redes mediante el llamado algoritmo de recocido simulado (*simulated annealing*).

En este proyecto se realizará el dimensionado de una red de prueba, de tan solo cinco tramos, que permita un primer acercamiento al programa EPANET y su módulo WaterNetGen. Tras esto se realizará el dimensionado completo de una red real de riego a presión situada en Fonz, dentro de los regadíos de La Litera Alta (Huesca), formada por 95 tramos que abastecen una superficie de unas 1000 hectáreas. El resultado será comparado con el obtenido previamente a través de otros métodos de dimensionado.

A continuación, se dimensionarán un total de nueve redes colectivas de riego a presión previamente dimensionadas con el Método de la Serie Económica y con el Método Recursivo. Como en el caso anterior se compararán los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

Finalmente, se discutirán las ventajas y desventajas de la utilización de WaterNetGen para el dimensionado de redes de riego a presión. Entre las ventajas, destaca su gratuidad y sus buenos resultados. Como desventaja se encuentra el hecho de que es una herramienta orientada al dimensionado de redes de abastecimiento urbano, por lo que no contempla algunas especificidades de las redes de riego, que deben ser introducidas artificialmente.

De los resultados obtenidos, se concluirá que WaterNetGen ofrece buenos resultados para el dimensionado, al nivel de otros métodos usuales, por lo que se puede considerar una herramienta válida para el dimensionado de redes colectivas de riego a presión.

## 1. OBJETIVOS

Los objetivos principales a alcanzar en este Trabajo Fin de Grado son:

1. Hacer una revisión bibliográfica del “estado del arte” del dimensionado de redes de riego a presión. Se persigue conocer los principios generales del dimensionado óptimo de redes así como los diferentes métodos de dimensionado.
2. Lograr un manejo avanzado del programa informático EPANET de simulación hidráulica de redes presurizadas.
3. Un manejo avanzado del módulo WaterNetGen de dimensionado de redes en EPANET.
4. Dimensionado básico de una red pequeña. Esta red ha sido una red de cinco tramos con planteamiento sencillo a la que se ha llamado “red de prueba”. Esta red de prueba ha servido para afianzar el manejo básico tanto de EPANET como de su módulo WATERNETGEN.
5. Dimensionado avanzado de una red real de riego a presión perteneciente a la localidad oscense de Fonz. Para ello se han utilizado los datos y características previamente establecidos para el dimensionado real de la misma.
6. Nueve redes reales extraídas de un estudio comparativo entre el dimensionado recursivo y el método de la serie económica (González-Cebollada, 2008; González-Cebollada et al., 2011). Con las cuales se pretende reforzar y afianzar el uso del módulo WaterNetGen con las diferentes características planteadas por estas nueve redes de riego.

Se pretende con esto, y tomando como base el programa de cálculo hidráulico EPANET, analizar cómo funciona su módulo WaterNetGen. Analizándolo y comparándolo con otros programas de cálculo hidráulico como GESTAR y el Método

Recursivo. Esto nos permitirá tener una visión más completa y generalizada de diferentes métodos de dimensionado de redes de riego.

Al tener como base programas específicos para el cálculo de redes de riego podemos claramente analizar los puntos en los que el módulo WaterNetGen es más débil, ya que arrastra algunos planteamientos de su programa matriz EPANET (enfocado claramente a las redes de abastecimiento urbano) y olvida algunas consideraciones necesarias, y que simplificarían el planteamiento hidráulico de la red, en el cálculo de redes de riego.

Se decidió usar este programa por el reto que planteaba la demostración con un programa tan poco extendido en el cálculo de redes de riego como es WaterNetGen de lo que es el dimensionado óptimo de redes. Se planteó el proyecto desde un principio como una demostración académica que pusiera en valor lo aprendido durante el proceso de realización del proyecto.



## 2. INTRODUCCIÓN

## 2.1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.

El desarrollo de las infraestructuras de riego ha hecho necesaria la investigación en el campo del dimensionado de redes colectivas presurizadas con el objetivo de optimizar la metodología de diseño de las mismas. En la actualidad y con las herramientas informáticas disponibles, podemos obtener procedimientos de diseño de las redes de riego más ágiles y que permiten un manejo de infinidad de variables en un tiempo razonable, mejorando sustancialmente el cálculo. Muchos de estos métodos son mejoras de otros propuestos anteriormente, de gran validez, pero complejos en su manejo debido a la cantidad de parámetros que deben utilizar.

Así pues con este trabajo se pretende:

- Conocer los métodos de dimensionado de redes a presión existentes y el dominio en el manejo de EPANET y su módulo WaterNetGen (a partir de ahora WaterNetGen).
- Aplicar los métodos de dimensionado a una red básica, con el objetivo de un primer acercamiento al programa EPANET y a su módulo WaterNetGen.
- Estudiar y comparar una red de riego real (ubicada en Fonz, Huesca) y el dimensionado óptimo de esta misma con el módulo WaterNetGen.
- Estudiar y comparar el dimensionado de nueve redes reales que servirán de refuerzo y afianzamiento de la herramienta informática WaterNetGen, por parte del alumno.
- Determinar, para las redes de estudiadas, que métodos ofrecen mejores soluciones, teniendo en cuenta las peculiaridades de la red y las limitaciones de cada metodología.

Los métodos de dimensionado de redes de riego pueden ser de dos tipos: continuos y discretos.

Se denominan métodos continuos a aquellos en que los diámetros de las tuberías se consideran variables continuas, pudiendo tomar cualquiera de los infinitos valores existentes dentro de un intervalo. Algunos de los métodos continuos más utilizados son: Velocidad Máxima Recomendable, Velocidad de Mougne, Pendiente hidráulica constante y Método de la Serie Económica.

Se denominan métodos discretos a aquellos que consideran los diámetros de las tuberías variables discretas, es decir, toman un número finito de valores, correspondientes con los diámetros comercialmente disponibles. Algunos de los métodos discretos más utilizados son: Programación lineal, Método Labye/Granados y Método Recursivo.

Los utilizados en nuestra comparación han sido:

- Método continuo: Método de la Serie Económica. GESTAR<sup>1</sup>.
- Método discreto: Método Recursivo.

Se contrastarán los resultados obtenidos por los diferentes métodos de dimensionado a fin de establecer los diámetros idóneos de las tuberías que integran una red de riego a presión. Las soluciones admisibles son muchas ya que el dimensionado no es un problema directo y determinado, y los procedimientos que se van a utilizar tratan de aproximarse lo más posible a la óptima.

---

<sup>1</sup> Programa de diseño y simulación hidráulica y energética de redes de riego a presión (www.acquanalyst.com)

## 2.2. EL DIMENSIONADO DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN.

Las redes de riego presurizadas presentan estructuras arborescentes, en las que desde un punto de alimentación se ramifican las aristas progresivamente, de manera que a cada nodo llega una única arista (excepto al nodo de cabecera). Por el contrario, desde cada nodo puede partir más de una arista. Una red con esta estructura de árbol recibe el nombre de *estrictamente ramificada*.

Denotando por N el número de nodos de una red y por A el número de aristas, para redes estrictamente ramificadas se cumple:

$$N = A + 1 \quad (1)$$

Es decir, el número de nodos es uno más que el número de aristas (llamadas indistintamente tramos o elementos).

El problema básico de dimensionado de una red de riego presurizada estrictamente ramificada consiste, según González (2006), en encontrar la combinación más barata de tuberías comerciales que, asociadas a los tramos de la red, cumplen los requisitos hidráulicos que se especifiquen.

Para abordar el dimensionado de una red, se han de conocer previamente los caudales de diseño asociados a cada tramo, que pueden ser calculados mediante técnicas deterministas o bien mediante técnicas probabilísticas (caudales de Clément, por ejemplo).

Una vez conocidos los caudales de diseño, el problema del dimensionado óptimo de una red es un problema determinista, en el sentido de que entre todas las combinaciones posibles de tuberías comerciales aplicadas a la red que satisfacen los *requisitos de diseño*, existe alguna cuyo coste global es mínimo.

Tales requisitos de diseño pueden ser:

- **Limitaciones en la presión en los nodos.** En cada nodo suele establecerse una presión mínima del agua, de manera que se garantice la función para la que se encuentra destinado. En el caso de puntos de consumo (de salida de flujo hacia el exterior del sistema), la presión ha de ser suficiente para garantizar un correcto funcionamiento de los métodos de aplicación del agua al campo (aspersión, goteo...), teniendo en cuenta las pérdidas en equipos de filtrado, en la propia red de amueblamiento de la parcela, así como posibles elevaciones del terreno de la parcela respecto del punto de alimentación. En nodos que no representan puntos de alimentación, también es necesario establecer presiones de diseño positivas para evitar la posibilidad de que se produzcan presiones negativas que permitan la entrada al sistema de materia exterior a través de fisuras o de juntas, o que puedan producir bolsas de vacío en el interior de las conducciones, por el peligro que conlleva su colapso o por el riesgo de aplastamiento de las conducciones.
- **Limitaciones en la velocidad de circulación del fluido.** Velocidades excesivamente bajas pueden dar lugar a sedimentaciones en el interior de las conducciones y a problemas sanitarios, mientras que velocidades demasiado altas pueden ser origen de erosiones en la tubería, amén de agravar los efectos de las ondas de presión transitorias (golpes de ariete).
- **Limitaciones en el timbraje de las tuberías.** Cada tramo de una red ha de tener asociado un timbraje mínimo (presión interior que es capaz de soportar la tubería). Este timbraje mínimo ha de ser mayor que la presión estática que origina el punto de alimentación. También conviene que el timbraje mínimo sea mayor que las sobrepresiones producidas por golpes de ariete, originados usualmente por paradas de bombas o por cierres de válvulas. Usualmente se aplica un margen de seguridad para los timbrajes además del propio de las tuberías, marcado por la reglamentación técnica establecida.

Así, unidos estos requisitos de diseño a los caudales mínimos, a la topología de la red y a la relación de tuberías comerciales disponibles, el problema del dimensionado óptimo de una red consiste en asociar a cada tramo una tubería, de manera que se cumplan los requisitos de diseño de la forma más económica posible.

Existen métodos que no tienen en cuenta criterios económicos para el dimensionado de las redes. Se trata de los llamados *métodos funcionales*, en los que el esfuerzo se centra en satisfacer los requisitos hidráulicos del sistema de una forma razonable (UPV, 1993). En general requieren poco esfuerzo computacional, y en la práctica están en desuso precisamente por no atender a consideraciones de ahorro económico en su planteamiento.

Por ejemplo, se puede dimensionar una red según el **criterio de velocidad máxima recomendable**. Básicamente, se trata de obtener los diámetros de los tramos de la red a partir de la expresión de continuidad:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} v \quad (2)$$

Así, establecido un valor máximo para la velocidad de circulación del fluido  $v_{\max}$  y conocidos los caudales de diseño  $Q_i$ , es posible obtener para cada tramo el diámetro teórico mínimo  $D_i$  que satisface el límite de velocidad máxima.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_i}{\pi \cdot v_{\max}}} \quad (3)$$

Otro método funcional se basa en el **criterio de la pendiente hidráulica constante**. La pendiente hidráulica  $j$  entre dos nodos 0 y  $n$  de una serie de tramos se define como el cociente entre la pérdida de altura piezométrica admisible entre ellos ( $H_n - H_0$ ) y la distancia que les separa ( $L_{0 \rightarrow n}$ ), según la expresión:

$$j = \frac{H_n - H_0}{L_{0 \rightarrow n}} \quad (4)$$

El dimensionado según el criterio de la pendiente hidráulica constante se basa en repartir la pérdida de carga disponible en una serie de tramos de manera que la pendiente hidráulica en los tramos sea la misma.

Los métodos funcionales, en especial aquellos que atienden a criterios de velocidad, deben seguirse de una etapa de comprobación de presiones en los nodos de la red, pues es posible que las restricciones de presión no queden satisfechas.

En el caso de redes en configuración como estrictamente ramificada, con caudales de diseño y trazado impuesto, existen diferentes métodos consolidados para el dimensionado que incluyen criterios de optimización económica, esto es, que determinan combinaciones de conducciones que consiguen satisfacer los requisitos de presión impuestos, para los caudales de diseño, con un coste global más o menos próximo al coste global mínimo.

En particular, el **Método de la Serie Económica** (Munizaga, 1976) realiza un dimensionado óptimo “por series” de una red. Una serie -también llamada senda- es un conjunto de tramos sucesivos. Para conformar las series de una red y determinar en qué orden deben ser dimensionadas, se atiende al criterio del “nodo más desfavorable” o “nodo crítico”.

Para cada serie de tramos, el Método de la Serie Económica establece una función de *coste de la serie* a partir de una función continua de *coste de las tuberías* que relaciona el diámetro de una tubería con su precio, en la forma:

$$C = AD^a \quad (5)$$

En la expresión anterior, C representa el coste por unidad de longitud de una tubería, y D representa el diámetro interior de la tubería. Los coeficientes A y a provienen de la interpolación de los precios de las tuberías comerciales disponibles.

Así, el coste total de una serie se puede expresar como:

$$C_T = \sum_{j \in \text{Serie}} A \cdot D_j^a \cdot L_j \quad (6)$$

donde  $L_j$  representa la longitud del tramo j.

En el caso de que la altura de cabecera de la serie sea desconocida, han de tenerse en cuenta los costes de bombeo del agua, de manera que en el coste total de la serie debe tenerse en cuenta la altura de bombeo  $H_b$ , el coste energético anual por metro de altura de bombeo  $K_b$  y el factor de amortización anual de tuberías  $a_t$ , llegándose a la expresión:

$$C_T = K_b H_b + a_t \sum_{j \in \text{Serie}} A \cdot D_j^a \cdot L_j \quad (7)$$

El Método de la Serie Económica minimiza las funciones de coste (5) y ((7) mediante el método de optimización de los multiplicadores de Lagrange (Curtis 1991, Larson, 1999), para llegar a una expresión que relacionan los diámetros de cada tramo con el resto de parámetros de la serie. En la formulación clásica del método, se llega a expresiones del tipo:

$$D_i = K \cdot q_i^{\frac{2}{a+b}} \quad (8)$$

donde  $D_i$  es el diámetro del tramo  $i$ -ésimo de la serie,  $K$  representa la llamada *constante de la serie*,  $a$  es el exponente de la expresión y  $b$  depende de la formulación de pérdida de carga utilizada.

Conviene señalar que en la constante  $K$  interviene el coeficiente  $M_j$  de la fórmula general de pérdida de carga:

$$h_{f,j} = M_j L_j q_j^{m_j} D_j^{-r_j} \quad (9)$$

Este coeficiente depende del diámetro -también depende de la rugosidad y del caudal circulante-, por lo que el cálculo de los diámetros  $D_i$  mediante la ecuación ((8) debe realizarse mediante un proceso iterativo en el que el valor de  $K$  sea actualizado para cada nuevo valor de  $D_i$ , hasta lograr la convergencia del método.

Este método conduce a una *formulación en diámetros continuos*. Es decir, los diámetros que obtiene mediante la fórmula ((8) son diámetros teóricos, que deben ser



“aproximados” a los diámetros “discretos” suministrados por los fabricantes de tuberías. Por ello, tras la aplicación del Método de la Serie Económica es necesaria una etapa de “normalización” de los diámetros, en la que debe tenerse en cuenta:

- Que se cumplan los requisitos de presión en los nodos.
- Que en las bifurcaciones exista presión suficiente para alimentar a otras series de la red.
- Que se cumplan los criterios de velocidad máxima y mínima de circulación del fluido.

El **método de Labye** (Labye, 1966) es un método discontinuo (discreto) de dimensionado óptimo de redes ramificadas. Está basado en el concepto de *pendiente económica*.

Supóngase que un tramo  $i$ , de longitud  $L_i$ , tiene asociada una tubería  $j$ , de manera que la pérdida de carga que se produce es  $h_{f,i}(j)$ . Si la tubería asociada al tramo  $i$  pasa a ser otra (llámese tubería  $k$ ), la nueva pérdida de carga es  $h_{f,i}(k)$ . Si los precios (en euros por metro, por ejemplo) de las tuberías  $j$  y  $k$  son respectivamente  $C_j$  y  $C_k$ , se define la pendiente económica como:

$$\phi_i^{j \rightarrow k} = -\frac{(C_k - C_j) \cdot L_i}{h_{f,i}(k) - h_{f,i}(j)} \quad (10)$$

Así, la pendiente económica es, para un cambio de tubería en un tramo, la ratio entre incremento de coste y ganancia de presión, es decir, el precio que cuesta ganar una unidad de presión.

En su variante más usual, el método de Labye toma como punto de partida, para una serie de tramos, los diámetros disponibles de menor diámetro que satisfacen los criterios de velocidad del diseño. En el caso normal de que tal elección no satisfaga los requisitos de presión en la serie, se intentan aumentar los diámetros atendiendo a la pendiente económica. En un proceso iterativo, se comparan las pendientes

económicas de todos los aumentos de diámetro posibles. El aumento de diámetro de menor pendiente económica pasará a formar parte de la solución provisional, y el proceso se repetirá hasta que los requisitos de presión sean satisfechos.

En la práctica, el Método de la Serie Económica y el método de Labye no son demasiado diferentes, pese a que el primero es un método continuo y el segundo es discontinuo.

Como ya se ha señalado, en el Método de la Serie Económica los diámetros continuos deben ser normalizados, lo cual ocasiona un exceso o un defecto de presión que debe ser corregido. Si, como es habitual, tal corrección se realiza atendiendo a las pendientes económicas, resulta que el Método de la Serie Económica pasa a ser una variante del método de Labye en la que se toma como punto de partida los diámetros teóricos obtenidos tras la minimización de la función de coste, en lugar de tomarse los diámetros mínimos posibles en los tramos de la serie que se está dimensionando.

En general, la aplicación del Método de la Serie Económica es “menos laboriosa” (Pérez, 1993) que la aplicación del método discontinuo de Labye, en el sentido de que conlleva menos cálculos al estar el punto de partida más cercano a la solución que se persigue.

Existe también una variante del método de Labye que toma en consideración el conjunto de la red, en lugar de analizarla por series de tramos, tal como se describe en (Pérez, 1993).

El **método de Granados** (Granados, 1990) se basa igualmente en el concepto de pendiente económica. Se trata de un método también discontinuo en el que se afronta el dimensionado global de la red, sin dividirla en series.

El método de Granados toma como partida una “solución previa” en la que se asigna a cada tramo de la red la tubería más barata posible, sin infringir las restricciones de velocidad y de timbraje. Con esta disposición, se calcula la altura de cabecera necesaria para satisfacer las alturas piezométricas requeridas en todos los

odos de la red. Esta altura de cabecera será muy elevada, pues los diámetros de los tramos son mínimos y, por tanto, las pérdidas de presión en ellos son altas.

Con la altura de cabecera calculada, se dará la circunstancia de que existe un nodo (podrían ser varios) en el que el “exceso de presión” es nulo. Es decir, habrá un “nodo crítico” que impide que la altura de cabecera sea menor.

A partir de la solución previa, comienza un proceso iterativo consistente en aumentar, según el criterio de mínima pendiente económica, el diámetro de un tramo que permita ganar presión en el nodo crítico. De este modo, la altura de cabecera podrá descender hasta que se encuentre otro “nodo crítico” (o el mismo, pero con menor requerimiento de altura de cabecera).

El proceso iterativo descrito se repite las veces necesarias hasta que la altura de cabecera descienda hasta el valor real de la red que se está dimensionando.

**El método de Programación Lineal** (Labye 1966, Karmeli et al. 1968) es otro de los métodos discontinuos usuales para el dimensionado de redes ramificadas de riego.

Básicamente, el problema se plantea en términos de asociar inicialmente a cada tramo de la red una serie de “diámetros candidatos”, entendiéndose que el tramo está compuesto por una sucesión de subtramos de diferentes longitudes, tantos como diámetros candidatos se tengan.

El problema así planteado admite una solución mediante técnicas de optimización de programación lineal, adecuando los requisitos del problema de dimensionado a las correspondientes restricciones matemáticas del problema. Es usual utilizar el algoritmo “simplex” (desarrollado por el matemático George Dantzig en 1947).

Como punto de partida para la selección de “diámetros candidatos”, se puede tomar, por ejemplo, el resultado teórico del Método de la Serie Económica.

Por otra parte, los **métodos de algoritmos genéticos** tratan de aplicar el paradigma de optimización matemática mediante algoritmos genéticos al dimensionado de redes (Simpson, 1994; Martínez, 1994), mediante una búsqueda heurística de la solución. Tienen mayor aplicación en sistemas urbanos de distribución de agua, por ser problemas más indefinidos.

El **método de dimensionado recursivo**, aprovecha la alta capacidad de computación disponible en la actualidad. Básicamente se basa en una exploración metódica del vasto árbol de soluciones posibles al problema del dimensionado mediante técnicas de recursividad, usando la técnica informática de “vuelta atrás” o “backtracking” (Golomb et Baumert, 1965).

El dimensionado de un sistema de riego o la ampliación de un sistema existente “no puede concebirse únicamente como una combinación de ejercicios matemáticos, por muy sofisticados que resulten” (Lischer, 1979). Si bien el autor de esta reflexión se refería a redes urbanas de distribución de agua potable (donde la fiabilidad del suministro y la calidad del agua cobran especial importancia, y conducen a diseños redundantes, hidráulicamente sobredimensionados), bien podría extenderse a redes de riego presurizadas.

El diseño de redes de riego presurizadas ha de someterse, efectivamente, a una serie de consideraciones de difícil cómputo matemático previo (facilidad de montaje, disponibilidad futura de recambios y accesorios, riesgo de deposiciones y obturaciones, necesidad de agotar partidas presupuestarias, aparición de escasez en los diámetros...) que pueden conducir a decisiones apartadas de la solución “matemáticamente óptima” del problema de diseño.

También debe ser tenido en cuenta el efecto de las ondas de presión transitorias (golpe de ariete), cuya intensidad y velocidad de propagación dependen, entre otras cosas, del material de las tuberías. Esta circunstancia puede propiciar que un análisis de transitorios del diseño de una red obligue a una reconsideración de determinadas decisiones, estableciéndose una dinámica de *retroalimentación* del proceso de diseño. El análisis de transitorios únicamente puede hacerse sobre una red ya dimensionada, por lo que es posible que sus resultados aconsejen una revisión de

las tuberías asignadas a cada tramo, un *rediseño*, que nuevamente deberá ser sometido a un análisis de transitorios.

En virtud de la visión panorámica presentada, se podría afirmar que la diversidad de metodologías existentes para el dimensionado de redes ramificadas presurizadas es un indicativo de la complejidad del problema que se aborda.

Existen diversas implementaciones informáticas y hojas de cálculo para el dimensionado de redes, que utilizan algunos de los métodos expuestos. Ninguna de las implementaciones actuales parece tener ventaja absoluta sobre las demás en cuanto a los resultados obtenidos, por lo que parece apropiado decir que, al menos desde un punto de vista práctico, el problema del dimensionado óptimo de redes se encuentra todavía abierto, sin una solución práctica definitiva.

El problema del dimensionado óptimo de una red estrictamente ramificada es, en esencia y según lo expuesto, un problema matemático cuya solución indudablemente existe, pues existe una combinación de diámetros más barata que todas las demás, pero que resulta muy difícil de encontrar.

## **2.3. EL PROGRAMA INFORMÁTICO EPANET.**

### **2.3.1. Presentación**

El programa EPANET es un programa de análisis hidráulico de redes a presión orientado a sistemas de abastecimiento urbano de agua, es un programa gratuito y de código abierto.

Básicamente, el programa EPANET realiza dos tipos de análisis:

-Análisis del comportamiento hidráulico de la red. Es decir, cálculo hidráulico de incógnitas del sistema (presiones, caudales...) a partir de los datos introducidos (suministros, consumos, cotas, características de las conducciones, bombas, válvulas...).

-Análisis de la calidad del agua de la red. EPANET incluye un modelo de evolución de una sustancia genérica disuelta en la red, que se transporta con el agua y que simultáneamente varía su concentración debido a reacciones químicas. Un ejemplo de aplicación usual es el estudio de la concentración de cloro en una red de abastecimiento de agua potable.

EPANET realiza análisis hidráulicos estacionarios, permitiendo la simulación en periodo extendido (a lo largo del tiempo) mediante la configuración de escenarios sucesivos cambiantes a través de herramientas específicas de modulación. En particular, se permite la modulación temporal de la demanda para simular, por ejemplo, las variaciones de los consumos de agua a lo largo del día en un sistema de abastecimiento urbano.

EPANET ha sido desarrollado por la División de Recursos Hídricos y Suministros de Agua del Laboratorio de Investigación Nacional para la Gestión de Riesgos, de la Agencia del Medio Ambiente de los Estados Unidos (Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory).

La versión española de EPANET 2.0 ha sido traducida por el Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia.

### 2.3.2. Manejo básico de EPANET

El interfaz del programa EPANET consta de diversos elementos entre los que destaca la ventana principal, llamada Plano de la Red, donde se representa gráficamente la red con la que se está trabajando. Una pequeña ventana contigua (Visor) permite controlar parámetros de visualización de datos y resultados (pestaña Plano) y observar y editar todos los datos y parámetros constitutivos de la red (pestaña Datos).

Sobre ambas ventanas se encuentran el menú de comandos (Archivo, Edición...) y la barra de herramientas del programa, con diversas opciones típicas de gestión de ficheros, impresión, edición, además de herramientas específicas de cálculo, análisis, visualización y creación de nodos y elementos.

Para la simulación de las diversas partes de que consta una red de abastecimiento de agua a presión, EPANET dispone de diversos tipos de nodos (o nudos, según la traducción de EPANET 2.0 VE) y elementos, representados cada uno de ellos por un botón de la parte derecha de la barra de herramientas. Los tipos de nodos son Conexión, Embalse y Depósito, mientras que los tipos de elementos son Tubería, Bomba y Válvula.

#### CONEXIÓN



Se trata de puntos de consumo de agua, unidos entre sí mediante tuberías u otro tipo de elementos. Requieren como datos:

- Demanda. El caudal de agua que extraen de la red. En el caso de que este valor sea nulo, el nudo representaría un punto de paso de agua sin consumo.
- Cota. Altura topográfica del punto donde se ubica el nudo.

El nodo de caudal puede representar consumos de agua diversos como consumos de viviendas, manzanas, sectores urbanos, industria o

abastecimientos a subredes. Cuando el consumo es nulo, puede representar bifurcaciones de tuberías o puntos singulares de la red.

Este tipo de nodo también permite una demanda dependiente de la presión, a través de un coeficiente de emisión.

## **EMBALSE**



Representa una fuente de abastecimiento de agua cuyo nivel es siempre constante. A efectos prácticos, su capacidad es ilimitada porque suministra cualquier caudal sin variar su altura piezométrica. Requiere como dato:

-Altura piezométrica. Si el almacenamiento se encuentra abierto a la atmósfera, coincidirá con la altura de la lámina libre de agua.

El embalse podría representar, además de embalses propiamente dichos, ríos, lagos o grandes depósitos. En general, cualquier almacenamiento de agua cuya altura piezométrica se mantiene constante en el análisis que se desea realizar.

## **DEPÓSITO**



Se trata también de almacenamientos de agua. A diferencia de los embalses, en los depósitos varía la altura piezométrica (el nivel del agua en depósitos abiertos a la atmósfera) en función de las detracciones o las aportaciones de agua de la red. Los parámetros que definen un depósito son:

- Cota de la solera del depósito.
- Niveles inicial, mínimo y máximo del agua. Para el cómputo de la evolución del nivel en el depósito en las simulaciones y para detectar su vaciamiento o desbordamiento.



- Diámetro. En el caso de ser un depósito cilíndrico, sería su diámetro. Para otras geometrías, debe calcularse un diámetro equivalente. EPANET también permite definir la curva de cubicación del depósito (relación entre el nivel y el volumen de agua), con lo cual el diámetro deja de ser necesario.

El depósito puede representar depósitos de cabecera, de cola o de modulación y su nivel formará parte de las incógnitas a calcular por el programa.

## TUBERÍAS



Representan elementos pasivos que transportan el agua a presión de un nodo a otro, desde el extremo con mayor altura piezométrica hasta el de menor. El agua circula a presión por el interior del elemento. Sus características principales son:

- Nodos inicial y final. Se trata de los nodos que conecta la Tubería.
- Longitud. Distancia que recorre la tubería.
- Diámetro. Se supone una sección circular de tubería.
- Rugosidad. Depende del material y también del estado de la tubería. Es necesario para el cómputo de las pérdidas de carga.
- Estado Inicial. La tubería puede estar abierta o cerrada, y también puede contener una válvula de retención.

La tubería puede representar todo tipo de conducciones a presión, desde pequeños tubos hasta grandes arterias de un sistema de abastecimiento urbano.

## BOMBA



Una bomba es un dispositivo que suministra altura piezométrica al fluido. Para su definición se requiere:

- Nodos inicial y final. Nodos que conecta la bomba.
- Curva característica. Relación entre caudal trasegado por la bomba y altura suministrada al fluido. Opcionalmente, también se puede establecer un funcionamiento a potencia constante, con lo que la altura de impulsión sería calculada directamente a partir del caudal circulante.

La bomba representa cualquier turbomáquina impulsora, ya sea rotodinámica (usualmente bomba radial), o de desplazamiento.

## VÁLVULA



Este tipo de elemento impone una limitación de presión o de caudal al fluido.

Requiere:

- Nodos inicial y final. Nodos que conecta la Válvula.
- Diámetro. Usualmente coincidente con el diámetro de las tuberías contiguas.
- Consigna. Valor límite que provoca la actuación de la válvula.

EPANET contempla diversos tipos de válvulas: válvula reductora de presión, válvula sostenedora de presión, válvula de rotura de carga, válvula limitadora de caudal, válvula de regulación y válvula de propósito general.

Para la simulación de las concentraciones de cloro en una red, todos los nodos admiten como dato la calidad inicial del agua, es decir, la concentración inicial de la sustancia cuya presencia en el agua se desea analizar (campo

calidad Inicial). De igual modo, en las tuberías se pueden introducir los coeficientes de reacción tanto en el seno del fluido como en la pared de la conducción, para el análisis del decaimiento (o aumento) de la sustancia que se analiza en la red.

Sobre las unidades de las magnitudes en EPANET, la versión española trabaja por defecto en el Sistema Internacional, tomando los caudales en litros por segundo, los diámetros en milímetros y la rugosidad en milímetros. La información completa sobre las unidades se encuentra en el menú Ayuda/Unidades.

### **2.3.3. EPANET para riego. Inconvenientes.**

En un documento comparativo entre el programa EPANET y el programa GESTAR (Equipo I+D+i GESTAR, 2012) se constatan las principales deficiencias de EPANET para el análisis hidráulico energético de sistemas de riego que se resumen a continuación:

- La complejidad para configurar patrones de demanda en hidrantes.
- Se deben introducir manualmente valores tales como diámetros interiores de las conducciones, pérdidas singulares o curvas características de bombas.
- Imposibilidad de definir bombas con curvas características H-Q que no sean monótonamente decrecientes.
- Dificultad para modelizar estaciones de bombeo directo con uno o varios grupos con regulación variable para el seguimiento de curvas de consigna.
- No dispone de información del comportamiento instantáneo de parámetros energéticos tales como el rendimiento o la potencia consumida.
- No permite evaluar los parámetros de Eficiencia Energética de Bombeo y de Eficiencia de Suministro Energético de forma detallada.

- Imposibilidad de modelización realista de sistemas de riego, tales como la incapacidad de modelar hidrantes en condiciones de baja presión y la de modelizar diferentes tipos de emisores para una misma red.

## 2.4. EL MÓDULO WATERNETGEN DE DIMENSIONADO DE REDES.

El módulo WaterNetGen es una extensión de EPANET concebida para generar modelos de redes de abastecimiento urbano y su posterior dimensionado (Muranho, 2012). Este módulo fue desarrollado por investigadores de la *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra* (Portugal).

El proceso de generación desarrollado por este grupo construye modelos reales de redes de distribución de agua que pueden ir desde sencillos modelos de pequeñas dimensiones a grandes sistemas compuestos por varios sistemas interconectados. El proceso de generación permite al usuario definir mapas, el número de áreas en las que se quiere dividir la red y el número de nodos en cada área. La idea de crear áreas es imitar el planteamiento real de los sistemas de riego que puede ser sectorizados (Muranho, 2012).

### 2.4.1. Modelo de generación de redes.

El algoritmo de generación de la red comienza con la creación de un árbol mínimo recubridor (Minimal Spanning Tree), es decir crea un subgrafo dentro de un grafo convexo y no dirigido que tiene que ser un árbol y contener todos los vértices del grafo inicial. Visualmente se representaría como en la Figura 1.

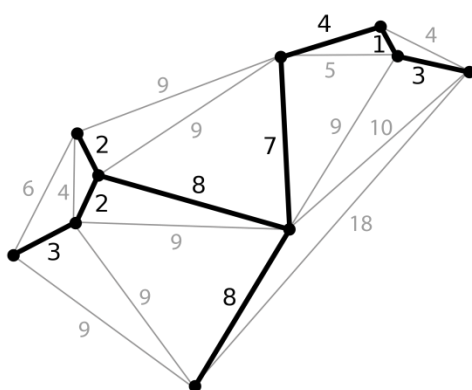


Figura 1. Fuente: wikipedia

Cada una de sus aristas lleva asignado un peso proporcional entre ellos, que es un número representativo de, en este caso, los costes y se usa para asignar

un peso total al árbol recubridor mínimo computando la suma de todos los pesos de las aristas del árbol.

Para generar una red de distribución se pretende llevar las tuberías por ciertos caminos, para lo que se hará un grafo que represente los nodos por la red. Algunos de estos caminos podrán ser más caros que otros, por ser más largos. Estos caminos serían representados por las aristas con mayores pesos. Un árbol recubridor para este grafo sería un subconjunto de estos caminos que no tenga ciclos pero que mantenga conectados todos los nodos. Puede haber más de un árbol recubridor posible siendo el árbol recubridor mínimo el de menos coste.

Este procedimiento está basado en el algoritmo de Prim (1957) definiendo los pesos por la distancia Euclidiana entre nodos (Muranho, 2012).

#### **2.4.2. Dimensionado de redes.**

El dimensionado de la red se produce tras la introducción de la base de datos de tuberías y consiste en un proceso iterativo que asigna diámetros comerciales, previamente introducidos en la base de datos, a cada tubería de la red respetando algunas restricciones. Estas restricciones son propuestas en función de un diámetro mínimo, una velocidad máxima y una presión mínima.

El paso previo y punto de partida del dimensionado es asignar los valores de los diámetros en la red inicialmente. Para ello el programa tiene tres procesos de asignación de diámetros iniciales (Epp et Fowler, 1970):

- Todos diámetros iguales a un valor definido por el usuario.
- Todos diámetros en base al diámetro mínimo permitido.
- Todos diámetros en base al camino más corto.

Tras esto el algoritmo empieza identificando los caminos más cortos desde los nodos a las fuentes (tanques y/o reservorios). La asignación de diámetros empieza desde los nodos más exteriores y va retornando hasta que todas las fuentes son encontradas, se han analizado los caudales y cambiado todos los diámetros de las tuberías visitadas. Los diámetros que quedan fuera de este camino son asociados con el mínimo diámetro permitido.

### Ajustes de los diámetros

Una vez han sido asignados los diámetros iniciales pasarán a ser modificados en función de dos reglas:

- La velocidad del agua en las tuberías debe estar por debajo de un valor preestablecido.
- La presión del agua en los nodos debe estar por encima de un valor preestablecido.

Para ajustar los diámetros en función en función del criterio de máxima velocidad permitida el programa emplea la siguiente fórmula (11):

$$V(D)= 0.127D^{0.4} \quad (11)$$

donde D es el diámetro en milímetros y V es la máxima velocidad permitida en m/s ( Sa Marques et Sousa, 2009).

En cada paso de la iteración se evalúa el caudal de las tuberías. El diámetro de las tuberías se establece en función del valor más pequeño que puede soportar el caudal aguas arriba sin exceder la máxima velocidad permitida. Como se desarrollará más adelante en las redes tratadas en este proyecto, la presión nodal mínima se asociará al número de pisos (lo que el programa nombra como *Storeys*) del edificio que supuestamente es abastecido por el nodo. En nuestro caso se hará una reinterpretación de este concepto para poder adaptarlo a las redes de riego en las que no ha lugar hablar de pisos como tal.

La regla de mínima presión es computacionalmente difícil de satisfacer. WaterNetGen recurre a un proceso basado en la búsqueda iterativa del nodo crítico (Muranho, 2012).

La combinación de estas dos reglas (máxima velocidad y mínima presión) generan rápidamente una red hidráulicamente consistente: cumple las restricciones de velocidad y presión. El siguiente paso que el programa realiza es el ajuste de costes, con un nuevo algoritmo evalúa la red introduciendo cambios para optimizarla.

### Algoritmo de recocido simulado (Simulated Annealing Algorithm)

Éste es el algoritmo que nos permitirá optimizar la red tras haber sido dimensionada acorde a las dos reglas anteriores.

El algoritmo de recocido simulado es un algoritmo de aproximación a la solución óptima, fundado en una analogía del comportamiento de sistemas termodinámicos simples y que debe su nombre al proceso de recocido del acero y las cerámicas (Vázquez, 1994).

Este algoritmo es un algoritmo de búsqueda meta-heurística para problemas de optimización en el que se persigue encontrar una aproximación adecuada al valor óptimo global de una función y con un espacio de búsqueda considerable.

La técnica de recocido simulado consiste en un proceso de búsqueda aleatoria utilizada en la resolución de problemas combinatorios de optimización. Fue propuesta por Kirkpatrick, Gelatt y Vechi en 1983.

El algoritmo parte de la solución inicial dada (en nuestro caso el dimensionado previo acorde a la regla de máxima velocidad y mínima presión), de una función objetivo que depende de la solución y del parámetro T (Temperatura). Este parámetro representa la probabilidad de que el algoritmo acepte una solución de inferior calidad a la solución encontrada hasta el momento. Debe ser una función decreciente del número de iteraciones, ya que de ese modo a medida que la solución mejore la probabilidad de aceptar soluciones peores disminuye como se puede observar en la Figura 2.



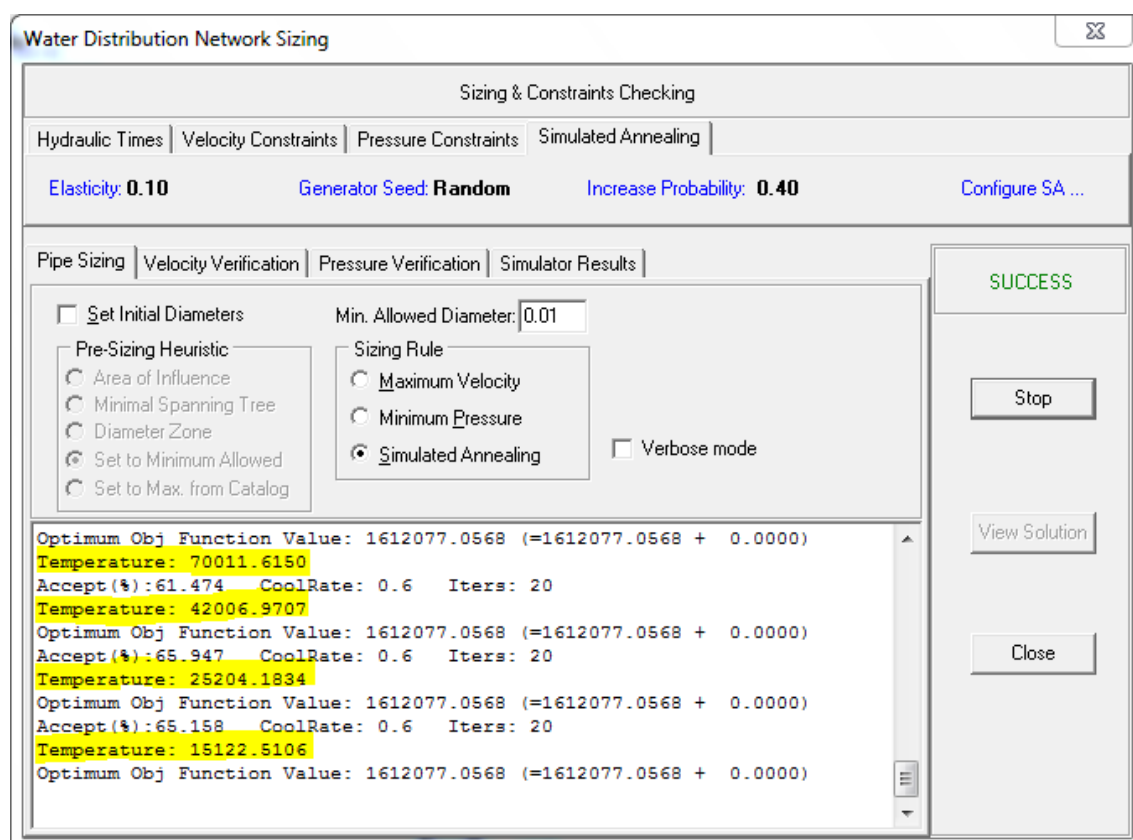


Figura 2. Disminución del parámetro Temperatura en el cálculo.

Con cada iteración se genera una solución representativa de la mejor solución encontrada por el momento, es decir, si la solución que se encuentra en ese momento es mejor que la anterior se toma como nueva solución. Como se ha comentado el algoritmo también puede aceptar soluciones inferiores, el motivo de que esto ocurra es que así evita los óptimos locales.

Este algoritmo de recocido se define por:

- Temperatura inicial y temperatura final ( $T_0$  y  $T_f$ ).
- Numero de iteraciones consecutivas durante las cuales la temperatura permanece constante.
- Cada  $N$  iteraciones la temperatura decrece.

- Tasa de enfriamiento

El algoritmo de recocido simulado se detiene según los siguientes criterios:

- Cuando se alcanza un número dado de iteraciones.
- Cuando un número de soluciones, previamente fijadas por el usuario, han sido rechazadas de forma consecutiva.
- Cuando se alcanza una temperatura final dado  $T_f$  (Torres et Vélez, 2006).

El tiempo utilizado por el algoritmo para llegar a la solución final puede demorarse en algunos casos horas.

### 3. METODOLOGÍA

### 3.1. RED DE PRUEBA

#### 3.1.1. Presentación de la red.

Como primer contacto con el programa planteamos una red de cinco tramos con un depósito. Esta sencilla red nos permitirá acercarnos al programa y familiarizarnos con su uso y funcionamiento. Es una red con cinco nodos (*junctions*), cinco tramos de tuberías (*pipes*) y un depósito (*reservoir*), siguiendo el esquema de la Figura 3.

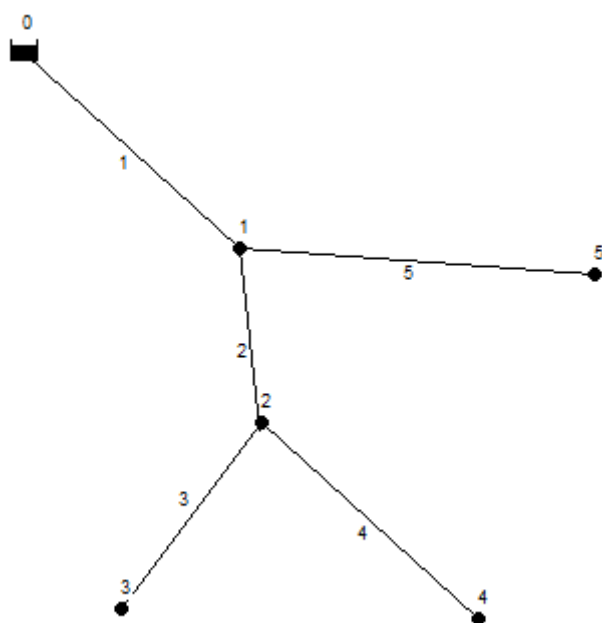


Figura 3. Detalle de la disposición de la red.

Los datos de las variables hidráulicas de los cinco tramos de la red se muestran en la Tabla 4 mostrada a continuación.

Tramo	NODO inicial	NODO final	LONGITUD (m)	CAUDAL DE DISEÑO (m <sup>3</sup> /s)	COTA (m)	PRESIÓN DE CONSIGNA (m.c.a)
1	0	1	100	0,5	0	10
2	1	2	150	0,4	0	10
3	2	3	300	0,2	0	40
4	2	4	200	0,2	0	40
5	1	5	175	0,1	0	40

Tabla 4. Variables hidráulicas de la red de cinco tramos.

La base de datos de tuberías comerciales que utilizaremos para el dimensionado contendrá tuberías de un mismo material y timbraje, todas ellas están ordenadas por precio, de forma ascendente. La base de datos se encuentra recogida en la Tabla 5 mostrada a continuación.

TUBERÍA	DIÁMETRO INTERIOR (mm)	RUGOSIDAD(mm)	TIMBRAJE (m.c.a)	PRECIO (euros/m)
A	113,0	0,007	80	9,31
B	126,6	0,007	80	10,44
C	144,6	0,007	80	11,59
D	162,8	0,007	80	12,50
E	180,8	0,007	80	15,39
F	203,4	0,007	80	16,92
G	226,2	0,007	80	21,42
H	253,2	0,007	80	23,92
I	285,0	0,007	80	28,62
J	321,2	0,007	80	36,08
K	361,8	0,007	80	49,00
L	407,0	0,007	80	57,45
M	452,2	0,007	80	68,24
N	506,6	0,007	80	82,58
O	570,0	0,007	80	101,13
P	642,2	0,007	80	127,86

Tabla 5. Base de datos de tuberías.

La presión de cabecera será establecida en 44 m.c.a. Será introducida en WaterNetGen como *Total Head* tal y como se muestra en la Figura 6.

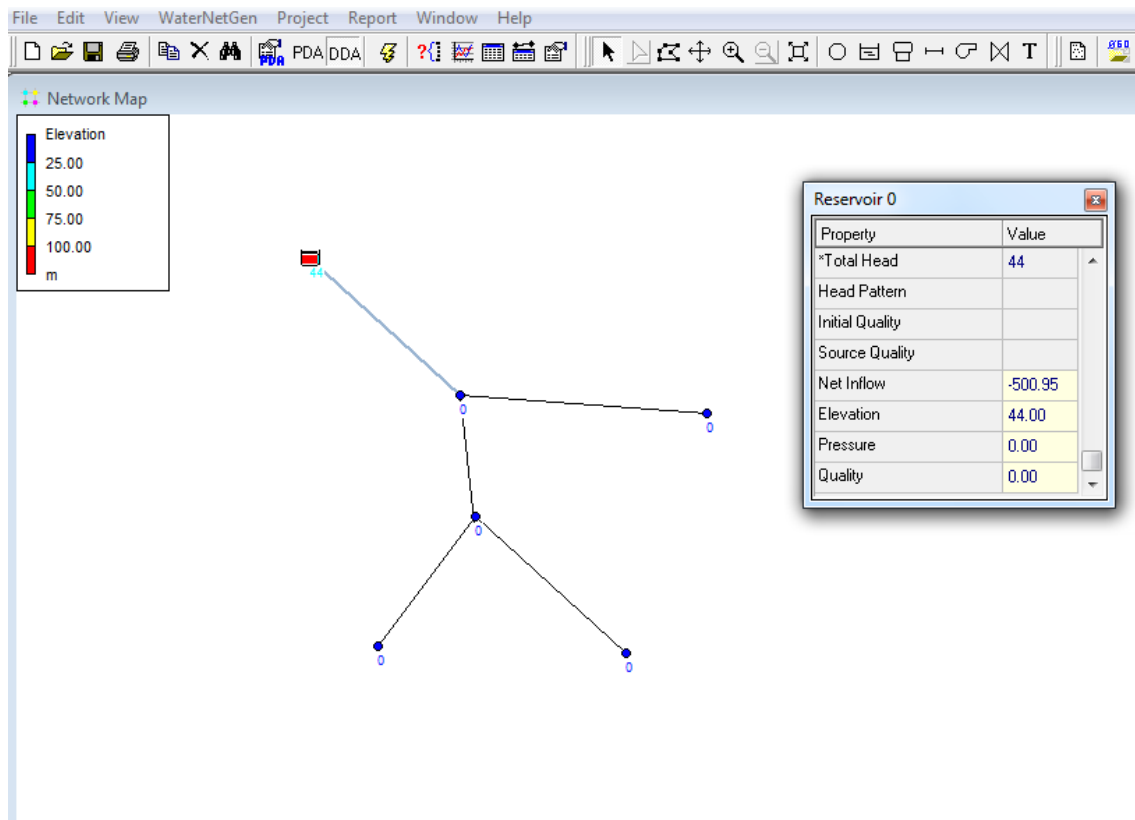


Figura 6. Introducción de la altura de cabecera.

### 3.1.2. Velocidad máxima y velocidad mínima.

Se establece una velocidad máxima de 2.5 m/s (Figura 7) y una velocidad mínima de 0.5 (Figura 8).

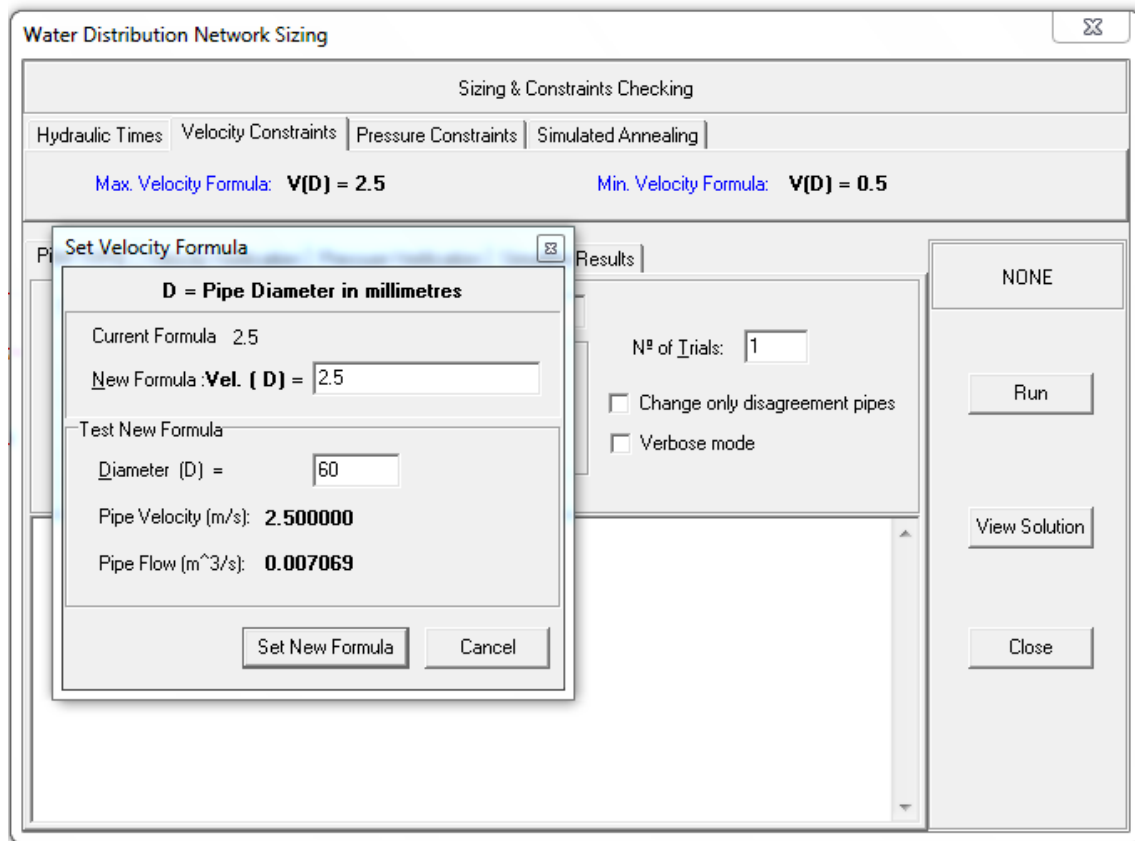


Figura 7. Introducción de la velocidad máxima

Como se puede observar en la parte de *test new formula* te indica cual sería el caudal para un determinado diámetro de tubería. Puede servir de referencia para establecer una u otra velocidad máxima.



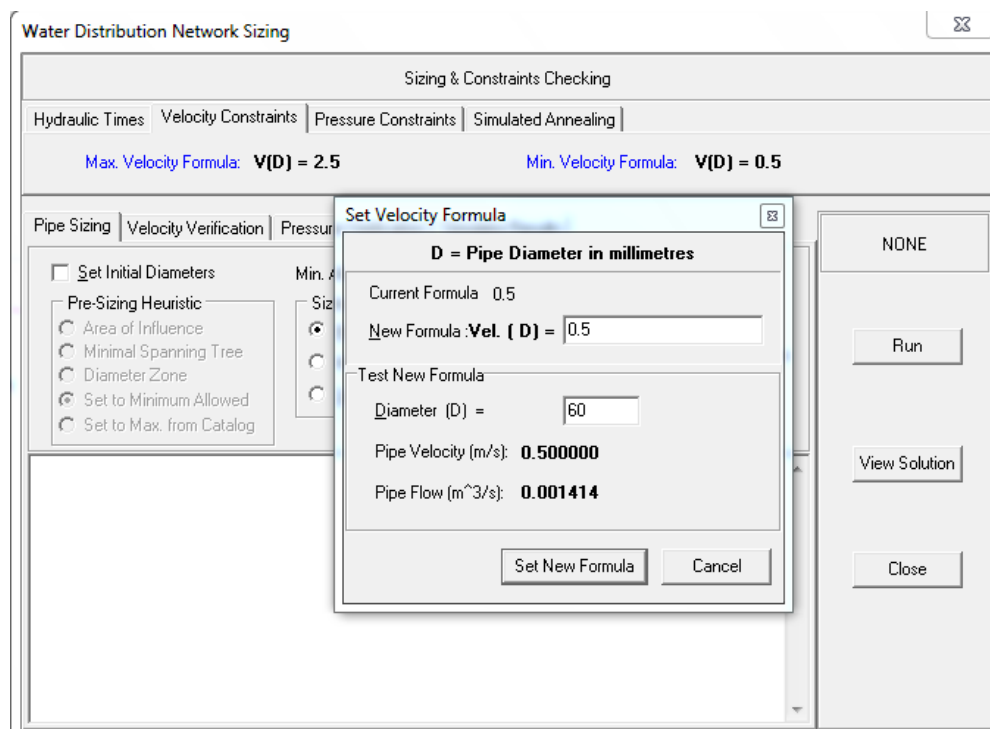


Figura 8. Introducción de la velocidad mínima.

### 3.1.3. Introducción de longitudes.

La introducción de las longitudes de las tuberías se realiza tramo por tramo, quedando nuestra red tal y como se muestra a continuación (Figura 9)

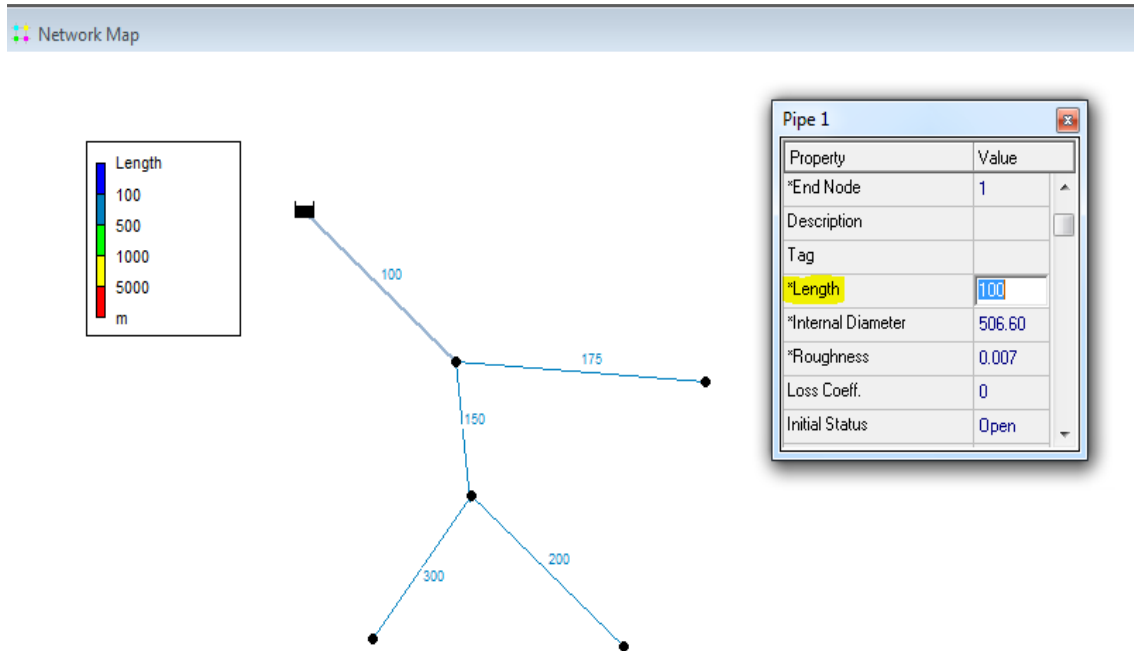


Figura 9. Detalle introducción longitudes.

### 3.1.4. Demandas.

Para saber la demanda base debemos, antes de nada, saber si el caudal de diseño dado corresponde al caudal de Clément o a caudal acumulado, ya que WaterNetGen no admite caudales de diseño en las tuberías, sino que necesita las demandas de diseño en los nodos.

En este sencillo ejemplo el caudal de diseño es el caudal acumulado. Era de suponer puesto que los caudales de Clément son habituales en redes de tamaño mediano o grande.

De esta forma hemos podido asignar las demandas a cada nodo donde observamos que el nodo 1 y 2 tienen demanda cero, es decir, en el sistema aquí planteado solo tienen una función de unión (Figura 10).

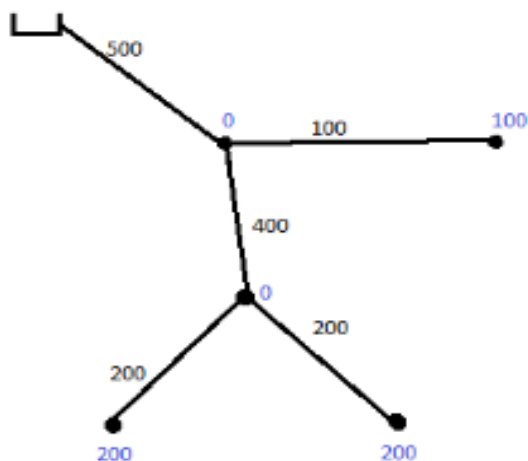


Figura 10. Detalle de demandas

\*Todas las magnitudes quedan expresadas en litros/segundo

\*Las magnitudes representadas en azul expresan la demanda de los nodos, el nodo cero o reservorio tiene una demanda negativa de 500 l/s, ya que es el que abastece al sistema.

### 3.1.5. Velocidades por los tramos.

A continuación se muestra la velocidad del agua por cada tubería. Como se puede comprobar en la Figura 11 se encuentra entre los valores establecidos como velocidad máxima y velocidad mínima, 2.5 m/s y 0.5 m/s respectivamente.

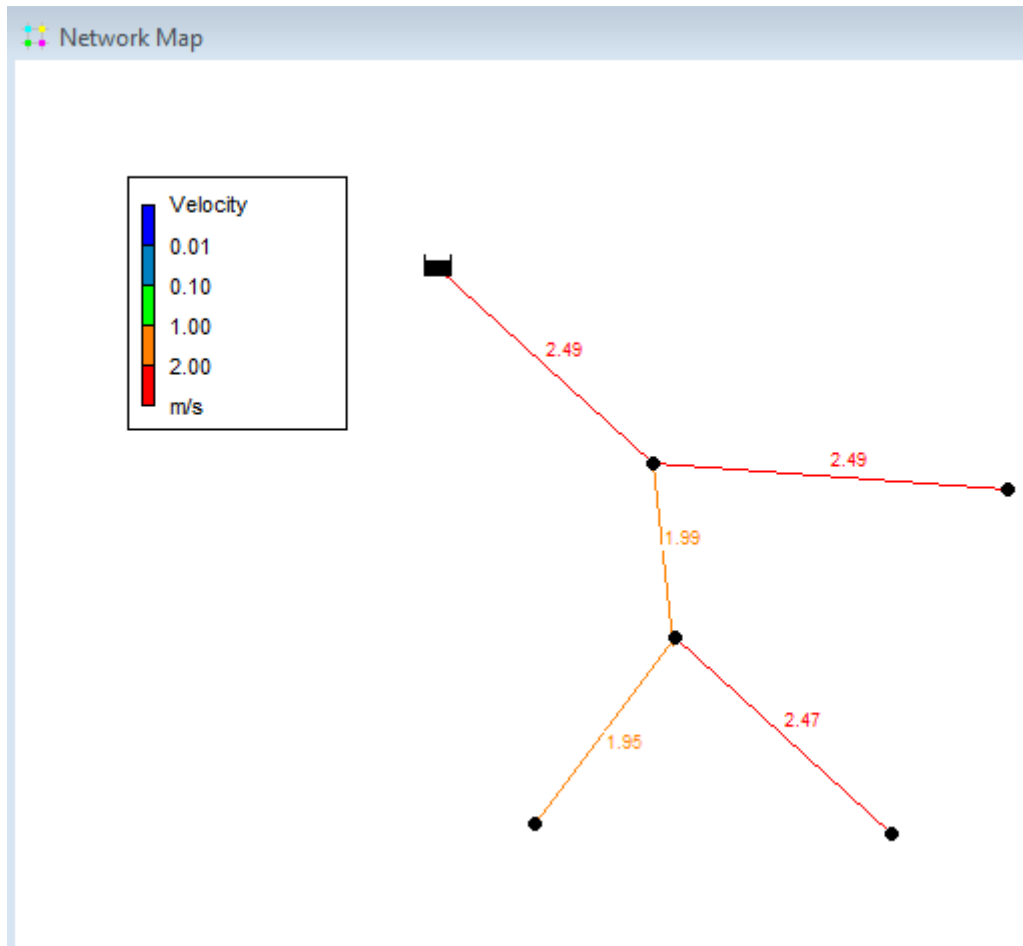


Figura 11. Velocidades en las tuberías

### 3.1.6. Presiones en los nodos.

A continuación en la Figura 12 se muestra la presión de cada nodo expresada en metros columna de agua (m.c.a).

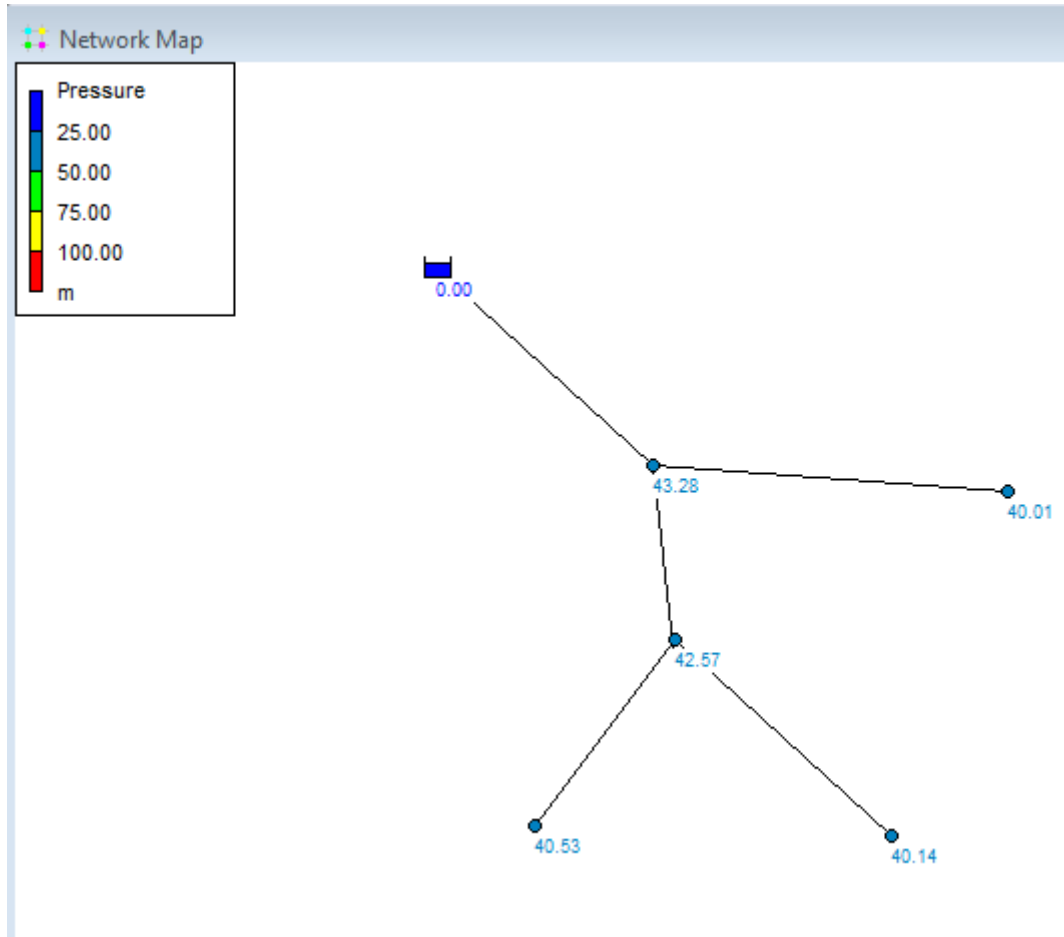


Figura 12. Detalle de presiones en cada nodo.

Como se puede comprobar en la Tabla 13 todas las presiones de los nodos pueden satisfacer la presión de consigna.

NODO	PRESIÓN(m.c.a)	PRESIÓN DE CONSIGNA(m.c.a)
1	43.28	10
2	42.57	10
3	40.53	40
4	40.14	40
5	40.01	40

Tabla 13. Presiones en la red de prueba.

### 3.1.7. Pérdidas de carga.

Las pérdidas de carga obtenidas con este planteamiento son las presentadas a continuación en la Figura 14. La fórmula elegida para el cálculo de las pérdidas de carga es la de Darcy-Weisbach.

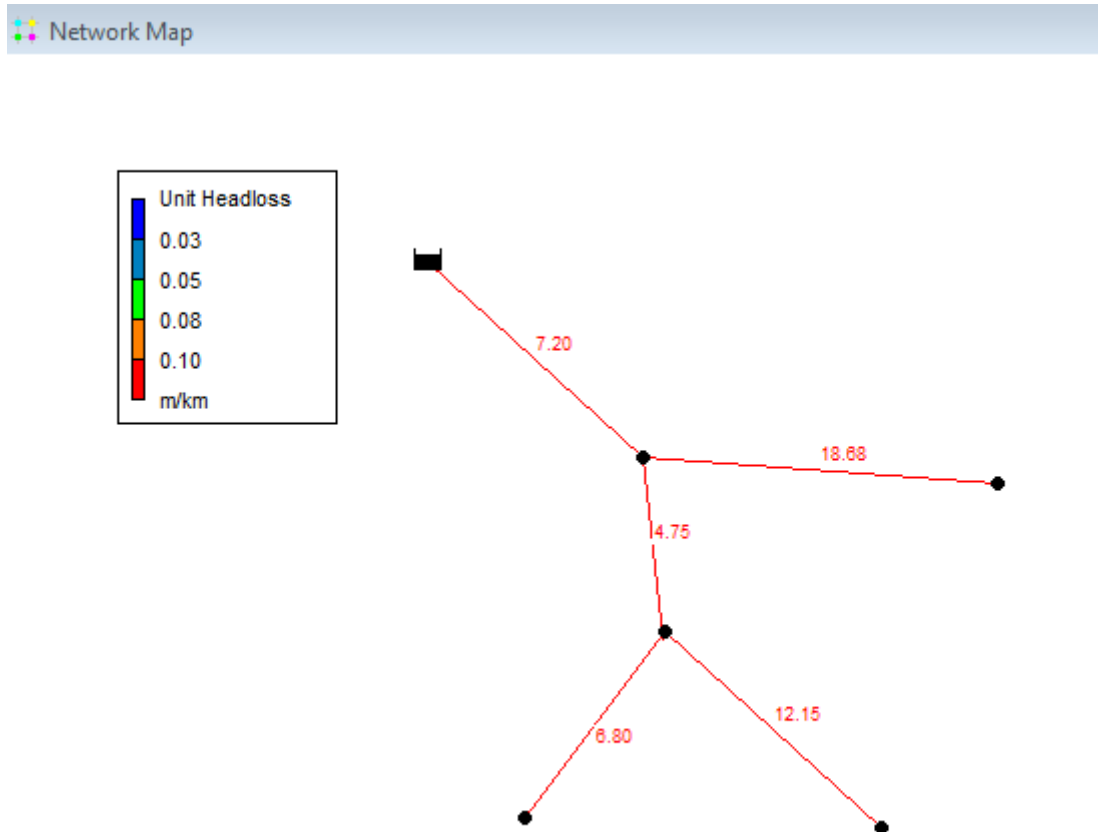


Figura 14. Pérdidas de carga en la red de prueba.

### 3.1.8. Pasos para el dimensionado.

Los pasos a seguir para obtener un dimensionado óptimo con WaterNetGen son los siguientes:

#### Máxima velocidad

Lo primero es resolver de acuerdo con la regla de dimensionando (*sizing rule*) de máxima velocidad. Se ejecuta el programa hasta que converja en un valor. Tras esto se obtendrá una red en la que solamente se han respetado las restricciones de máxima velocidad. El coste de la red obtenida de acuerdo a esta regla de dimensionado es de 40282.50 euros como se puede observar en la Figura 15.

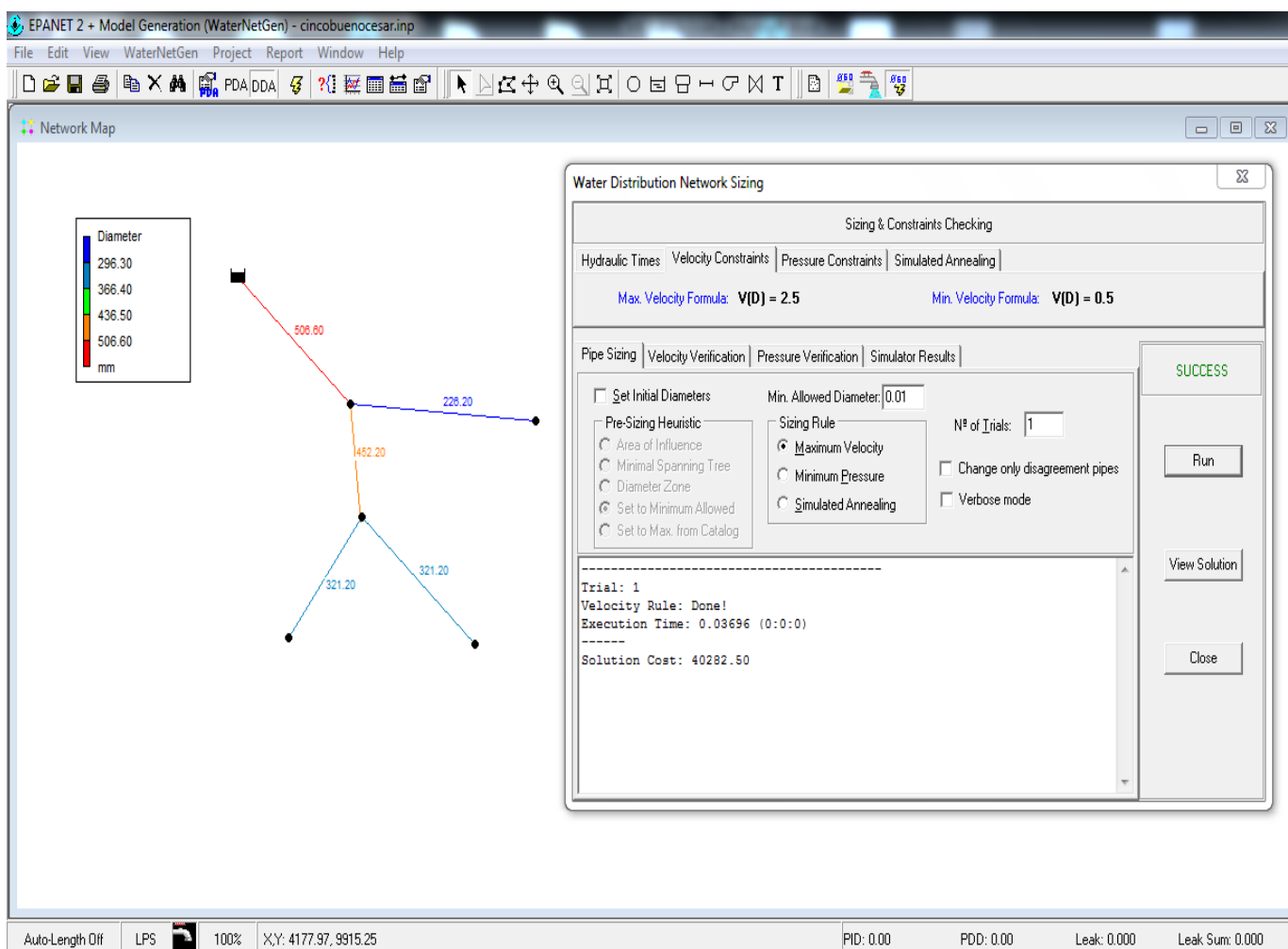


Figura 15. Dimensionado acorde a la regla de máxima velocidad.



### Mínima presión

El siguiente paso debe ser realizar un dimensionado de la red obtenida que también siga las restricciones de presión mínima. Se le ejecuta el programa hasta obtener un valor fijo, es decir una vez que haya convergido en un punto.

Tras estos dos tipos de dimensionado habremos obtenido una red en la que se respetan las variables hidráulicas que se han fijado como restricciones pero todavía no se ha tenido en cuenta ningún criterio económico. El precio de la red tras haber aplicado esta segunda regla es de 46309.5 euros (Figura 16).

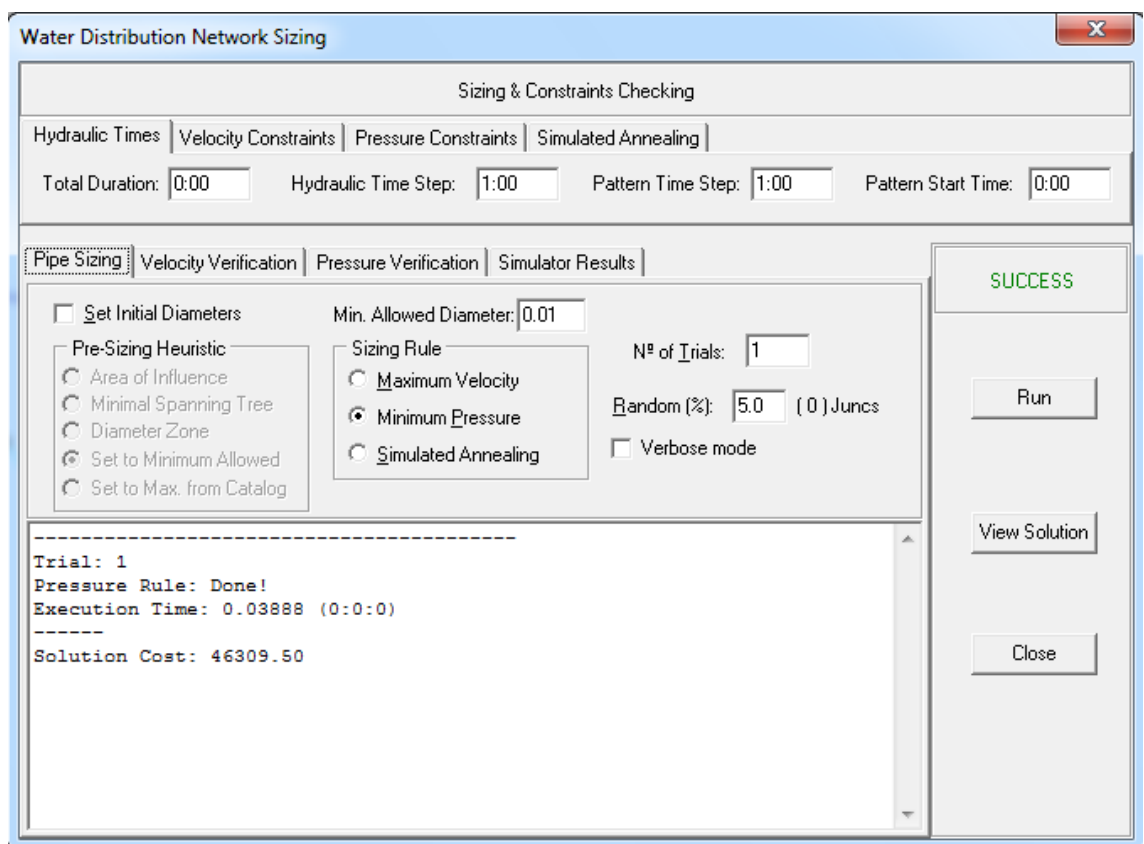


Figura 16. Dimensionado acorde a la regla de mínima presión.

### **Simulación de Annealing (*Simulated Annealing*)**

Seguimos ejecutando el programa para seguir obteniendo mejoras en la red, es decir hasta el punto que el programa encuentre el mejor coste posible mediante la aplicación del algoritmo de recocido simulado (*Simulated Annealing*).

Como podemos observar a continuación el coste total de la red tras la aplicación de la Simulación de Annealing es el mismo que el obtenido anteriormente tras aplicar la regla de mínima presión: 46309.50 euros (Figura 17).

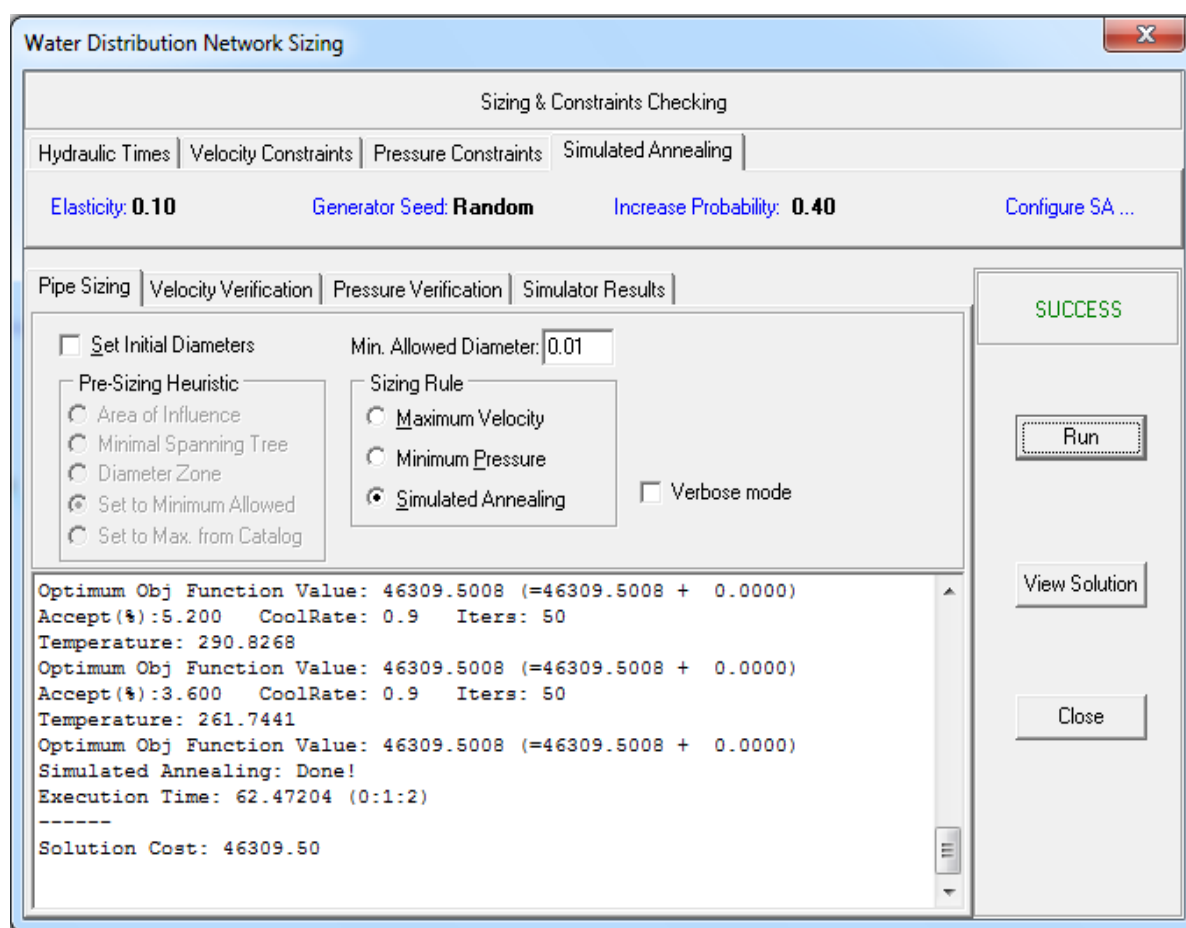


Figura 17. Resultado dimensionado acorde a la Simulación de Annealing.

El resultado del dimensionado sería el expuesto en la Figura 18:

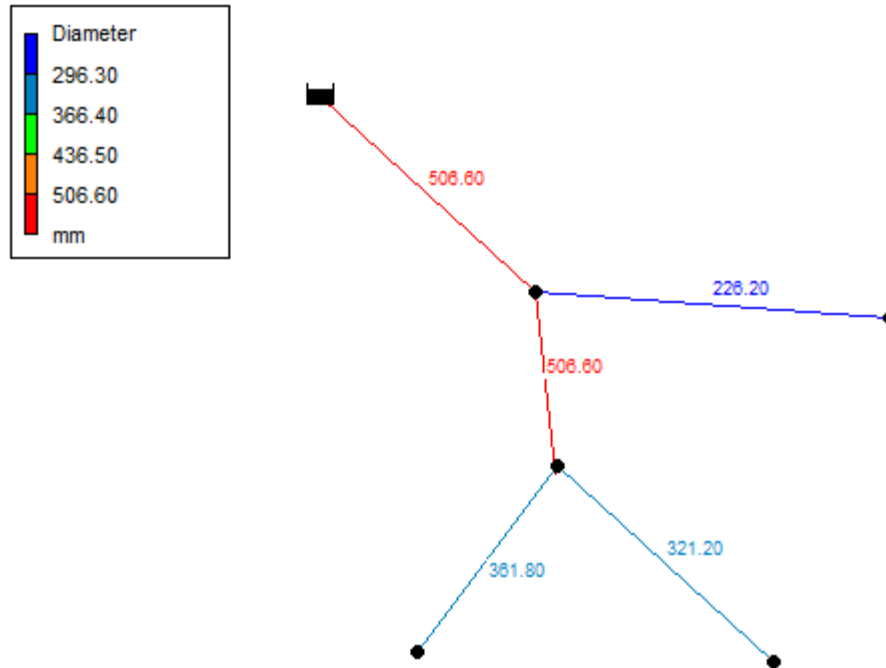


Figura 18. Resultado del dimensionado en la red de prueba.

### 3.2. RED REAL

La red que se va a estudiar ha sido dimensionada mediante diversos métodos por Macarulla (2009). A continuación se va a detallar el proceso de dimensionado a través de WaterNetGen y los resultados que se obtengan se compararán con los ya existentes.

#### 3.2.1. Importar parámetros. Presentación de la red.

El primer paso es importar la red desde el programa matriz EPANET, para así poder obtener la correcta disposición de la red, así como las cotas de cada nodo.

Esta red ubicada en Fonz y perteneciente a la red de regadíos de La Litera Alta consta de 95 tramos que abastecerán aproximadamente 100 hectáreas de superficie.

La red tiene un depósito situado a 485.483 metros de altura de cabecera. Los datos de las variables hidráulicas de la red se muestran en la Tabla 1 (página 15) del Anexo1.

En la Figura 19 se muestra la disposición de la red mediante EPANET y en la Figura 20 tenemos la misma red en GESTAR.

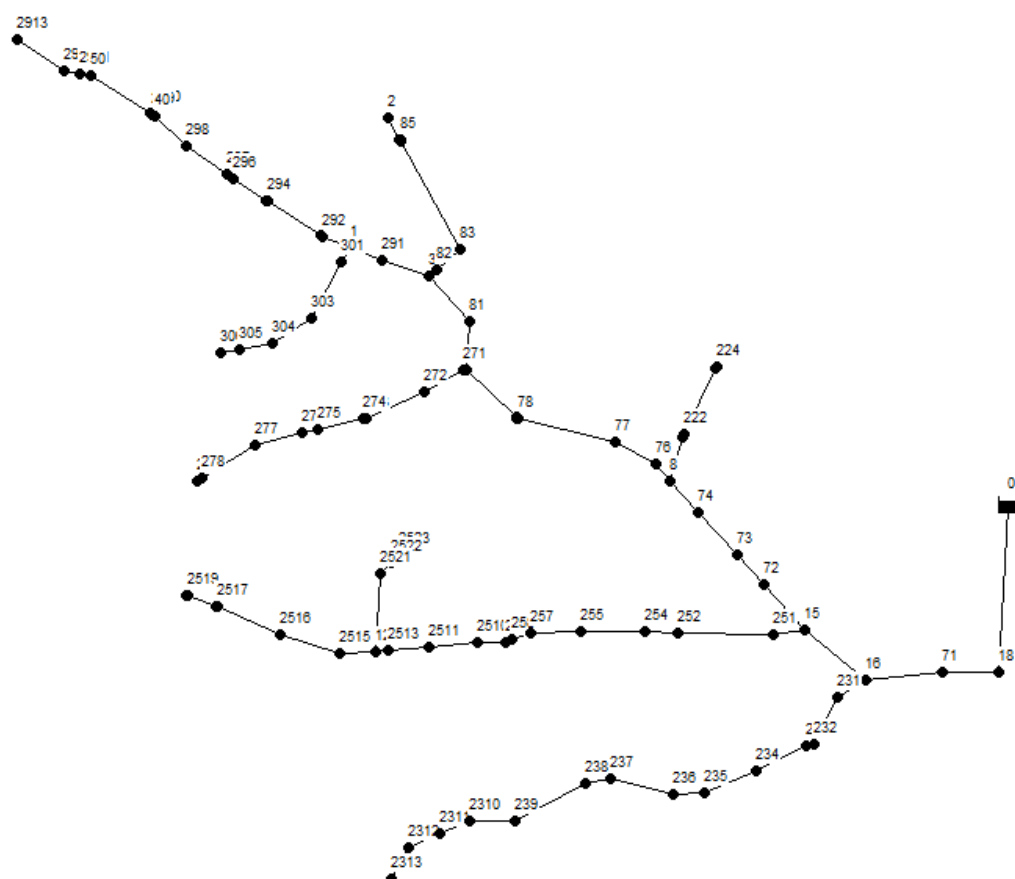


Figura 19. Disposición de los nodos en la red en EPANET.

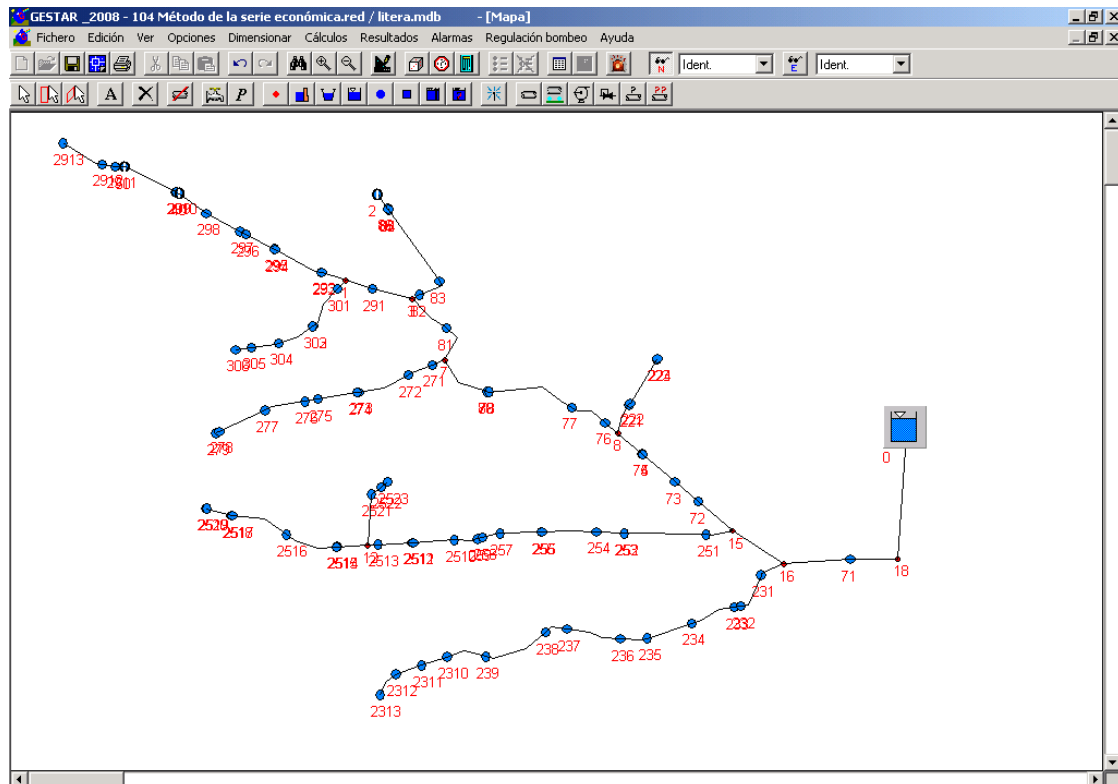


Figura 20. Disposición de la red mediante GESTAR

### 3.2.2. Cargar demandas.

A diferencia de otros programas para el dimensionado de redes como GESTAR, WaterNetGen no acepta los caudales de diseño de cada tubería directamente, deben ser introducidas las demandas en cada nodo. Esto supone un esfuerzo extra para el usuario de WaterNetGen que tendrá que hacer el balance hidráulico en cada nodo de la red.

El caudal de diseño de cada tramo es el caudal de entrada al nodo final de dicho tramo. Valiéndonos de esto se ha preparado una hoja Excel en la que se va nodo por nodo buscando los tramos en los que es nodo inicial y el tramo en el que aparece como nodo final (en las redes estrictamente ramificadas un nodo puede ser inicio de varios tramos pero tan solo nodo final de un tramo).

Así pues para calcular la demanda de un nodo en concreto sumaremos el caudal de salida de ese nodo (los caudales de diseño de los tramos en los que ese nodo actúa como nodo de inicio de tramo), este sumatorio será restado del caudal de entrada al nodo en cuestión (caudal de diseño del tramo en el que este nodo actúa como nodo de inicio de tramo).

Para saber la demanda en cada nodo se realiza un balance en cada nodo con los caudales de diseño. El caudal de diseño que entra a un nodo menos el caudal de diseño que sale de ese mismo nodo será la demanda.

Este cálculo se ha realizado con una hoja Excel mostrada en la Tabla 23 (página 66) del Anexo 4.

### 3.2.3. Presiones de consigna.

La presión de consigna es la presión necesaria para que el agua llegue desde el hidrante hasta el punto más desfavorable de la parcela que alimenta.

Como el objeto del presente proyecto es la comparación de dimensionados de una red ya establecida, se usarán para el cálculo los datos extraídos del proyecto, sin entrar en otras discusiones de tipo agronómico y de diseño de redes.

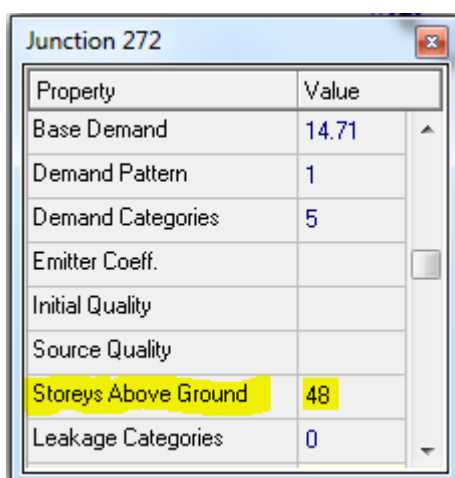
#### Introducción de Presión de consigna/Storeys above ground

Para introducir estos valores de presión de consigna debemos acceder desde cada nodo al apartado *Storeys above ground* (N).

El programa presenta este concepto como la altura (pisos) del edificio que debe abastecer ese nodo en cuestión. Este planteamiento es arrastrado desde su programa matriz destinado al abastecimiento urbano. Debiendo interpretarse este dato como presión de consigna cuando se trabaja con redes de riego.

Nodo por nodo se da el valor de N (Storeys above ground) que corresponderá a la presión de consigna en metros. Es decir la presión mínima que debe haber el nodo en cuestión. Tras el dimensionado se deberá comprobar que se cumple la presión de consigna en todos los nodos.

En la Figura 21 podemos observar cómo se introducen las presiones de consigna en WaterNetGen.



Property	Value
Base Demand	14.71
Demand Pattern	1
Demand Categories	5
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	48
Leakage Categories	0



Figura 21. Introducción de la presión de consigna en un nodo.

Para fijar las restricciones de presión en cada nodo el programa trabaja con la *N* (Storeys above ground, literalmente “pisos sobre la tierra”) introducida en metros.

La presión que se ejerce en una columna de agua de un metro es la que se muestra a continuación (12):

$$1 \text{ m.c.a} = 1000 \frac{\text{kg f}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ m} \cdot 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9806.65 \frac{\text{kg f}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 9806.65 \text{ Pa} = 9.80665 \text{ kPa} \quad (12)$$

El programa a la hora de fijar las restricciones trabaja en diferentes unidades (kPa) que la presión presión de consigna (m.c.a), motivo por el cual se introduce el factor de corrección 9.80665 justificado en (12) tal y como se muestra en la Figura 22.

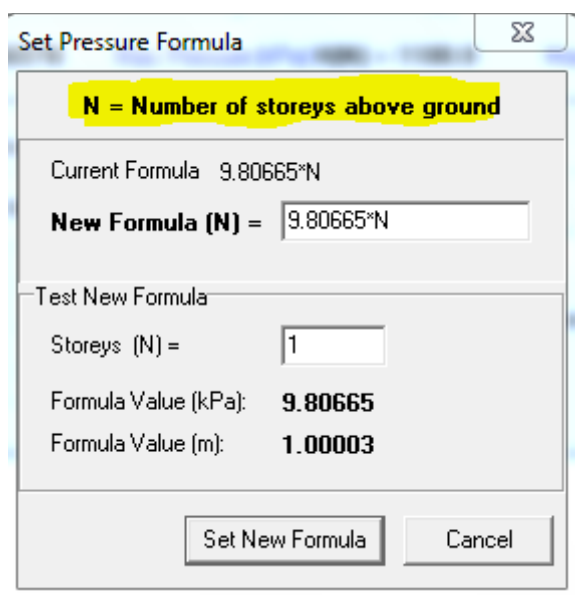


Figura 22. Fórmula de presiones para los nodos.

#### 3.2.4. Base de datos de tuberías.

- Introducir la base de datos de las tuberías, estas deben aparecer agrupadas por timbrajes puesto que el programa solo busca dentro del timbraje asignado a cada tramo. Se deben introducir los datos en la base de datos de tuberías tal y como se muestra a continuación.

- Commercial diameter/Diámetro comercial (mm).
- Wall Thickness/ espesor de la tubería. En nuestro caso nuestra valor será siempre cero puesto que los datos introducidos en el campo "Commercial diameter" son coincidentes con los diámetros interiores.
- Price/ Precio. Será introducido en "unidades monetarias / metro".
- Roughness Formula/Rugosidad (m). Existe la opción de trabajar con la fórmula de Hazen-Williams, con la de Chezy-Manning o con la de Darcy-Weisbach. Nosotros trabajaremos con esta última, introduciendo los datos en milímetros.

Tras la introducción de estos datos el programa devuelve los siguientes valores:

- Internal Diameter/ Diámetro interior (mm). En nuestro caso será coincidente con el valor introducido en "Commercial diameter".
- Max.Allowed Velocity/ Velocidad máxima permitida (m/s). La velocidad de flujo máxima que puede soportar la tubería
- Max.Allowed Flow/ Caudal máximo permitido ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). El caudal máximo que puede soportar la tubería

La base de datos de tuberías comerciales que utilizaremos para el dimensionado contendrá tuberías de dos tipos de materiales: PVC y Poliester, todas con una rugosidad de 0.057 mm (Darcy-Weisbach). Para que el programa lea todos los datos del catálogo de tuberías estas deben ser introducidas agrupadas por timbrajes, de no ser así el programa no respetará timbrajes y dimensionará la red en función de las tuberías más baratas independientemente de su timbraje.

Los timbrajes de las tuberías que nos encontraremos catalogadas (Figura 23,24 y25) pueden corresponder a lo que hemos llamado tipo a (60 mm de timbraje), al tipo b (100 mm de timbraje) o al tipo c (160 mm de timbraje).

The screenshot shows the 'Pipe Catalogue' window with the following settings and data:

- Units System:** SI (Diameters in millimeters)
- Roughness formula:**
  - ☐ Hazen-Williams
  - ☒ Darcy-Weisbach
  - ☐ Chezy-Manning
- Pipe Types:**

ID	Description	Commercial= Internal?	Roughness Hazen-Williams	Roughness (mm) Darcy-Weisbach	Roughness Chezy-Manning
A	PVC y POLIÉSTER	N	0.000000	0.057000	0.000000
- Pipe Classes for Pipe Type: A**

ID	Description
a	timbraje sesenta
b	timbraje cien
c	timbraje cientosesenta
- Pipe Diameters for Pipe Type/Class :A/a**

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)
190.20	0.00	8.130				190.20	2.500	0.0710
237.60	0.00	14.790				237.60	2.500	0.1108
299.60	0.00	20.550				299.60	2.500	0.1762
380.40	0.00	30.370				380.40	2.500	0.2841
789.40	0.00	110.520				789.40	2.500	1.2236
988.60	0.00	165.800				988.60	2.500	1.9190
1184.60	0.00	233.990				1184.60	2.500	2.7553
1382.80	0.00	284.010				1382.80	2.500	3.7545

Buttons at the bottom: Load ..., Save ..., Ok, Cancel, Preview.

Figura 23. Introducción de las tuberías en WATERNETGEN para el timbraje sesenta

Pipe Diameters for Pipe Type/Class :A/b

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)
184.60	0.00	11.680				184.60	2.500	0.0669
230.80	0.00	20.160				230.80	2.500	0.1046
290.80	0.00	31.760				290.80	2.500	0.1660
369.40	0.00	48.150				369.40	2.500	0.2679
782.40	0.00	129.370				782.40	2.500	1.2020
988.00	0.00	180.870				988.00	2.500	1.9167
1184.00	0.00	247.840				1184.00	2.500	2.7525
1382.20	0.00	300.420				1382.20	2.500	3.7512

Load ... Save ... Ok Cancel Preview

Figura 24. Introducción de las tuberías en WATERNETGEN para el timbraje cien.

Pipe Diameters for Pipe Type/Class :A/c

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)
176.20	0.00	18.990				176.20	2.500	0.0610
220.40	0.00	31.340				220.40	2.500	0.0954
277.60	0.00	49.190				277.60	2.500	0.1513
352.60	0.00	76.420				352.60	2.500	0.2441
779.60	0.00	148.220				779.60	2.500	1.1934
968.20	0.00	195.960				968.20	2.500	1.8406
1171.20	0.00	269.720				1171.20	2.500	2.6933

Load ... Save ... Ok Cancel Preview

Figura 25. Introducción de las tuberías en WATERNETGEN para el timbraje cientosesenta.

La base de datos de tuberías es la mostrada en la Tabla 26. En ella aparecen el diámetro interior expresado en milímetros, la rugosidad también expresada en milímetros, el timbraje en metros y por último el precio por metro lineal de cada tubería.

<b>DIÁMETRO INTERIOR(mm)</b>	<b>RUGOSIDAD (mm)</b>	<b>TIMBRAJE (m)</b>	<b>PRECIO (euros/metro)</b>
190.2	0.000057	60	8.13
237.6	0.000057	60	14.79
299.6	0.000057	60	20.55
380.4	0.000057	60	30.37
789.4	0.000057	60	110.52
988.6	0.000057	60	165.8
1184.6	0.000057	60	233.99
1382.8	0.000057	60	284.01
184.6	0.000057	100	11.68
230.8	0.000057	100	20.16
290.8	0.000057	100	31.76
369.4	0.000057	100	48.15
782.4	0.000057	100	129.37
988	0.000057	100	180.87
1184	0.000057	100	247.84
1382.2	0.000057	100	300.42
176.2	0.000057	160	18.99
220.4	0.000057	160	31.34
277.6	0.000057	160	49.19
352.6	0.000057	160	76.42
779.6	0.000057	160	148.22
968.2	0.000057	160	195.96
1171.2	0.000057	160	269.72

Tabla 26. Base de datos de tuberías con sus características fundamentales.

### 3.2.5. Asignación de timbrajes.

Se debe asignar el timbraje a cada tubería para satisfacer que en caso de tener la máxima presión posible en la red la instalación propuesta resista. Consideraremos un margen de seguridad para cada timbraje de 10 m.

En el catálogo de tuberías se debe separar por grupos según el timbraje, puesto que el programa asignará dentro de un grupo y no asignará un timbraje determinado a la tubería en cuestión si no que eso será una tarea a realizar por el usuario y que se detallará más adelante. El programa realizará la elección de la tubería buscando en el grupo de tuberías del timbraje que previamente le hayamos asignado.

En la base de datos utilizada para el dimensionado de esta red contamos con tres timbrajes: 60, 100 y 160 metros.

#### Determinación timbrajes

Para poder saber que timbraje le correspondería a cada tubería debemos someter la red a la condición más desfavorable de presión: que todos los nodos posean una demanda cero.

Se ha realizado una copia del proyecto y en esta nueva copia se cierran las demandas en todos los nodos. Esto se puede hacer con la herramienta Edit/Group Edit tras haber seleccionado todos los nodos de la red.

Habiendo realizado esto se conseguirá tener las máximas presiones posibles en la red: con todos nodos cerrados, sin demanda.

Sabiendo que debemos mantener un margen de seguridad en los timbrajes de 10 metros hacemos un visionado global de la red asociando las presiones por colores como se muestra en la Figura 27.

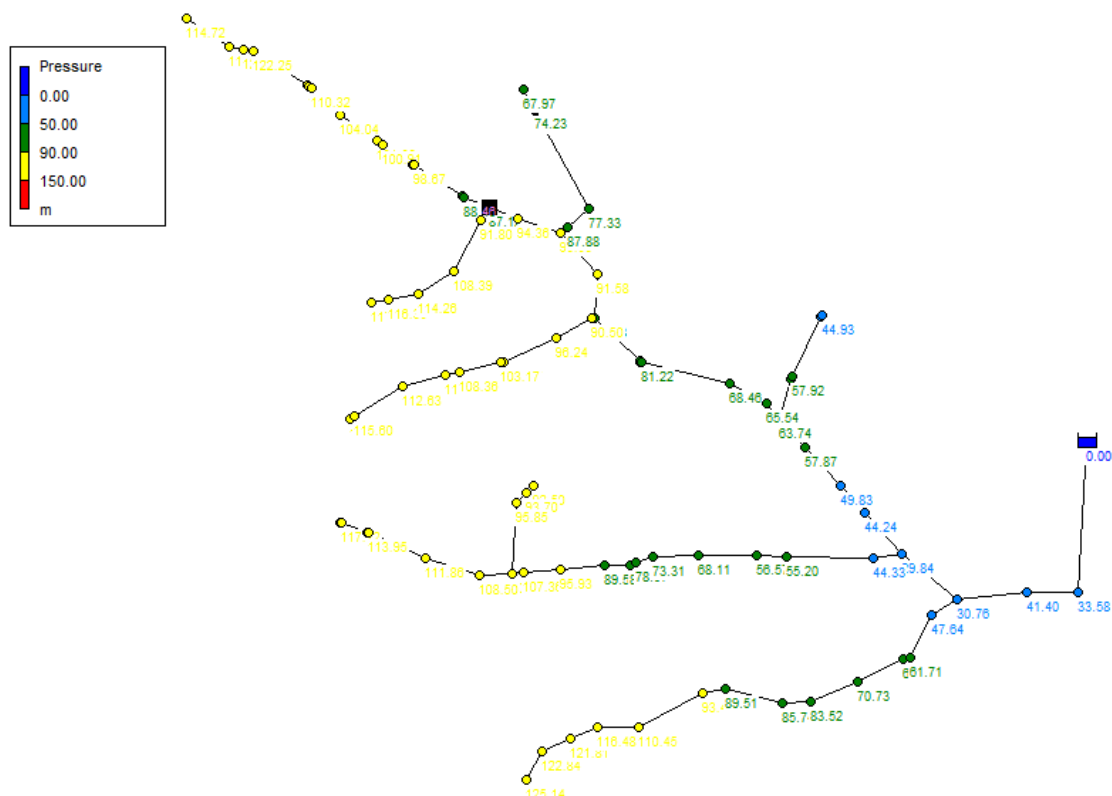


Figura 27. Vista de la red a demanda cero para las presiones 50,90 y 150 metros.

Esto nos va a servir para saber de qué timbraje tiene que ser cada tubería de la red original, es decir, este archivo de WaterNetGen que hemos creado ahora nos va a servir de plantilla para ir asociando manualmente en el otro archivo que tuberías son de timbraje 60, 100 o 160 mm.

Para ello y teniendo en cuenta que tiene que existir un margen de seguridad de 10m hemos establecido los límites en 50,90 y 150 m. Trabajando con el editor de leyenda (Figura 28) podemos establecer los límites que determinarán cada timbraje. El primer límite irá asociado al color azul, el segundo al color verde y el tercero al amarillo, es decir las tuberías que estén entre nodos coloreados en azul deberán ser de timbraje 60m, las tuberías que estén entre nodos coloreados en verde deberán ser de timbraje 100m y por último las tuberías que estén entre nodos coloreados en verde (o incluso rojo) deberán ser de timbraje 160m.

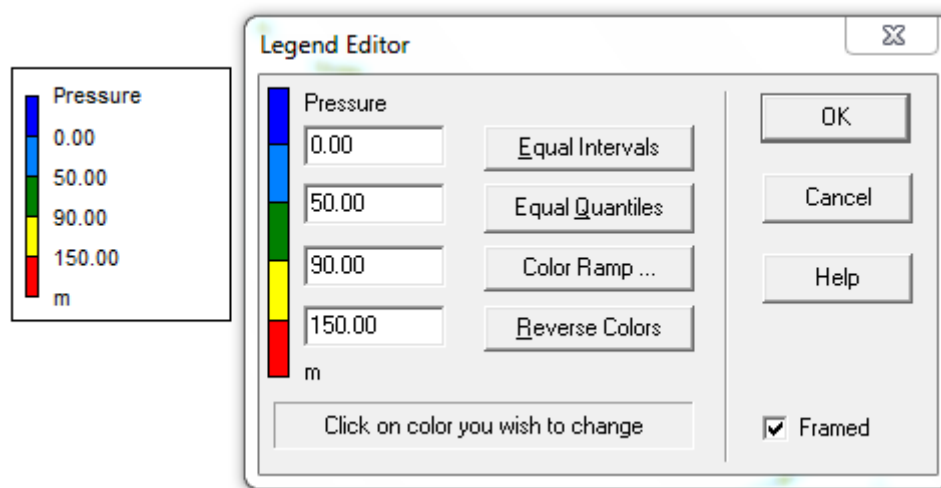


Figura 28. Introducción de presiones en función de los timbrajes y el margen de presión.

Si una tubería se encuentra entre nodos de diferente color prevalecerá el color asociado a una presión superior. Como podemos ver en la TU93 (Figura 29) que se encuentra entre el nodo 231 coloreado en azul (timbraje 60 m, tipo a) y el nodo 232 coloreado verde (timbraje 100 m, tipo b) por lo tanto esta tubería deberá ser de timbraje 100 m (el superior de los dos)

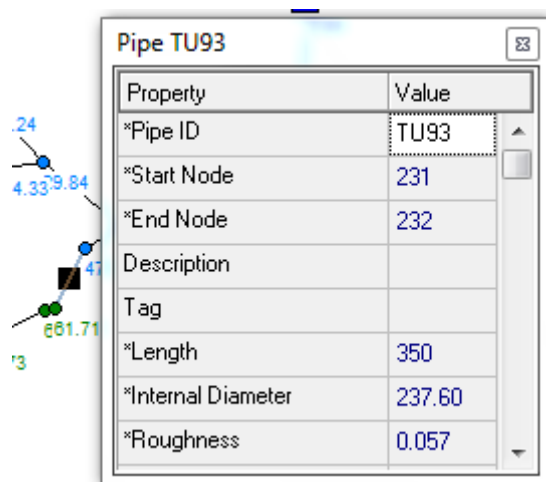


Figura 29. Vista de la TU 93 entre nodos de diferentes límites de presión.



Como se ha comentado anteriormente con la ayuda de esta plantilla representada por colores introduciremos manualmente en nuestra red inicial el tipo de timbraje que deben tener para cumplir hidráulicamente en el caso de alcanzar la presión máxima.

El programa contará con estas restricciones en cada tubería a la hora de elegir el diámetro de una tubería, buscando en el catálogo solo tuberías dentro del timbraje indicado. Las tuberías que hayan sido asociadas al tipo a solo serán dimensionadas con las tuberías del catálogo dentro del tipo a, que son las de timbraje 60 metros. Esto seguirá la misma dinámica para las tuberías asociadas al tipo b (timbraje 100 metros) y las asociadas al tipo c (timbraje 160 metros).

Volviendo al archivo inicial y utilizando de plantilla el creado ahora se va asignado por tramos el timbraje a cada tubería. Como se puede observar a continuación en la Figura 30 estas son las posibilidades de elección establecidas en esta red (tres timbrajes disponibles).

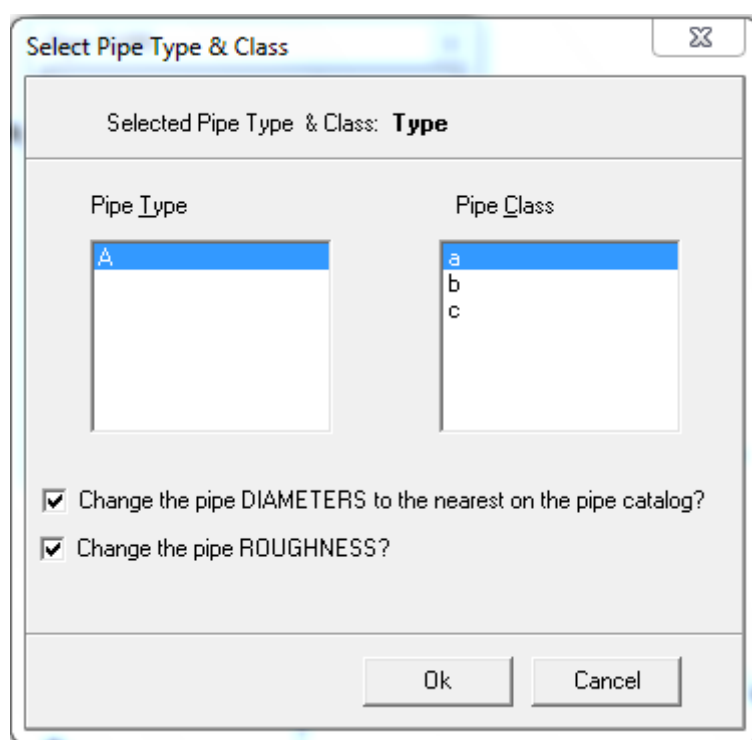


Figura 30. Selección de la clase (timbraje) de tuberías por tramo.

El cambio ha realiza en cada tubería debe ser hecho de forma manual valiéndonos de la plantilla, en el caso de la tubería TU81 mostrada en la Figura 31 podemos observar que ha sido asociada al timbraje tipo a.

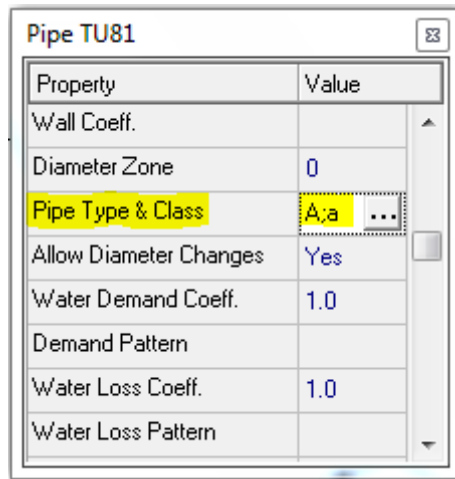


Figura 31. Detalle de la asignación de timbraje.

### 3.2.6. Restricciones de presión y velocidad.

#### Máxima y mínima presión

El programa necesita una mínima y una máxima presión para cada nodo, este tratará de resolver acercándose lo máximo posible a la presión mínima establecida. Esto significa que habiendo satisfaciendo la restricción de mínima presión ha realizado una optimización satisfactoria.

En la fórmula de la mínima presión trabaja con la presión de consigna, que será siempre la presión mínima a satisfacer. La presión de consigna será introducida nodo por nodo como “*Storeys above ground*” (en la fórmula se le designa como N). Como el WaterNetGen es un módulo de EPANET y este último está destinado al abastecimiento urbano la presión de consigna se considera como el nivel o el piso sobre el suelo en el que nos encontramos (“*Storeys above ground*” se traduce como pisos sobre el suelo).

El resultado de las fórmulas de presión son expresadas por el programa en kPa por lo tanto debemos pasar los m.c.a en los que se expresa la presión de consigna a kPa, como se muestra en la Figura 32.

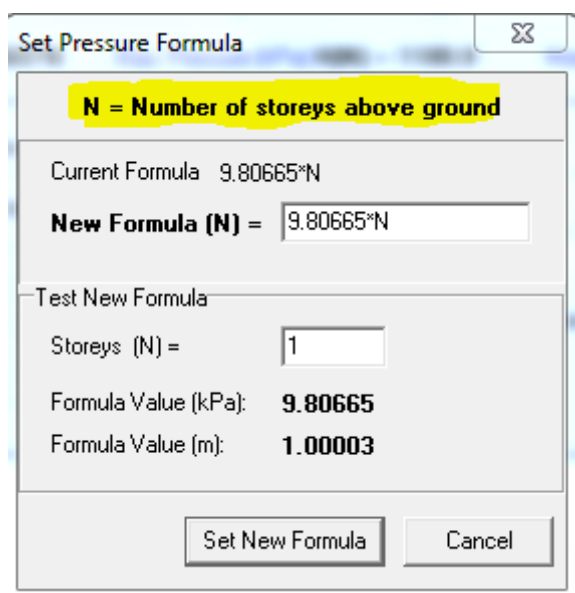


Figura 32. Fórmula aplicada para establecer la restricción de mínima presión.

Por lo tanto multiplicaremos la  $N$  expresados en m.c.a de la fórmula por 9.80665 para conseguir que el resultado sea en kPa tal y como demanda el programa. La justificación de porque se multiplica por esta cifra para pasar los metros de columna de agua en que se introduce el término  $N$  se ha justificado en el apartado de la Metodología (página 56) en la fórmula (12).

En la Figura 33 mostrada a continuación se puede observar cómo quedan las restricciones establecidas.

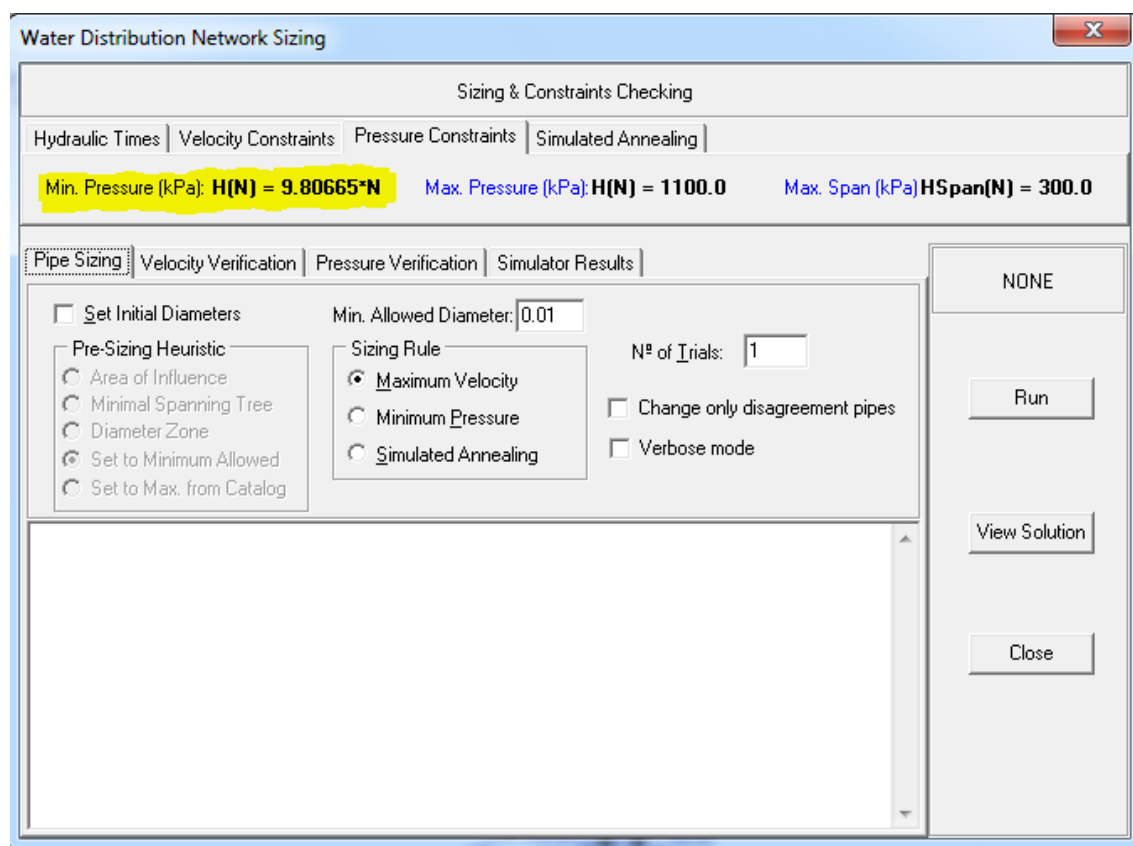


Figura 33. Establecimiento de restricciones.

La máxima presión viene dada por la cota, por muy alta que sea la presión de servicio no va a superar la presión estática (con las excepciones de los golpes de ariete), la cual está asegurada por los timbrajes de las tuberías que satisfacen la presión estática de la tubería. Por todo esto fijaremos su valor en un valor arbitrario de 1100 kPa como se muestra en la Figura 34.

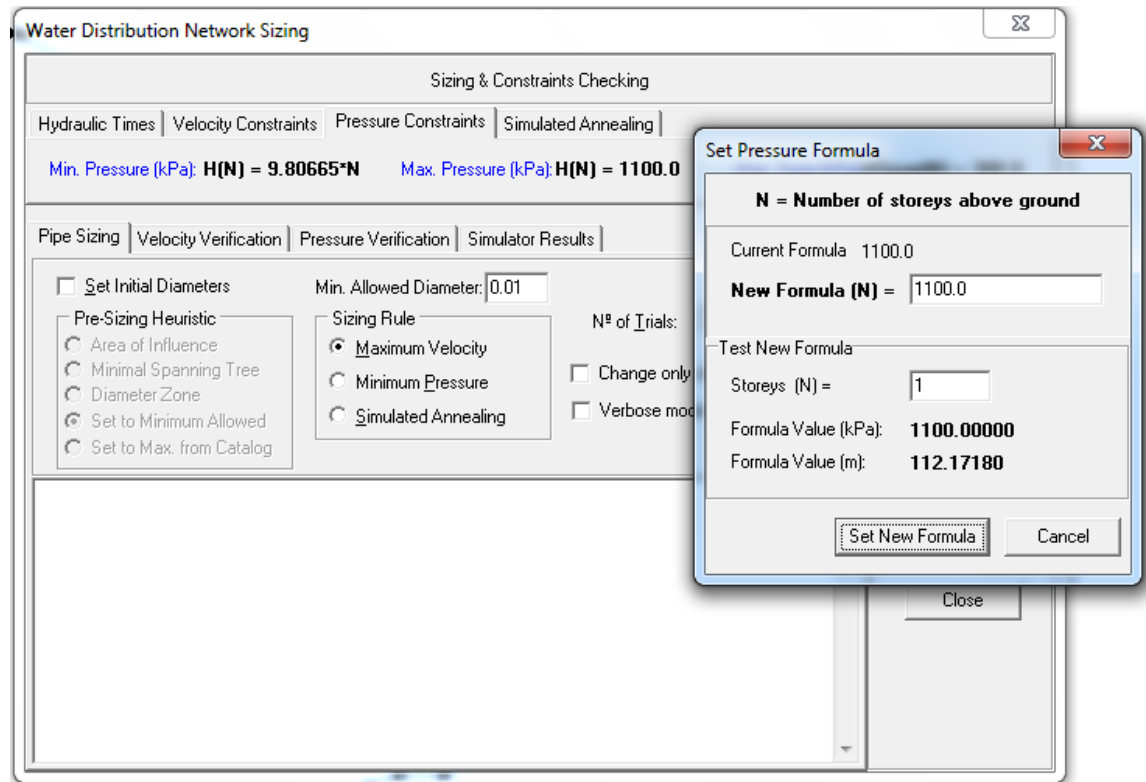


Figura 34. Valor de la máxima presión

### Máxima y mínima velocidad

En el proyecto original se ha fijado la velocidad máxima del fluido por las conducciones en un valor de 2.5 m/s (Figura 35).

La velocidad mínima ha sido fijada en un valor de 0.32 m/s. Velocidades excesivamente bajas del fluido pueden causar problemas de depósito de sedimentos en las tuberías (Figura 36).

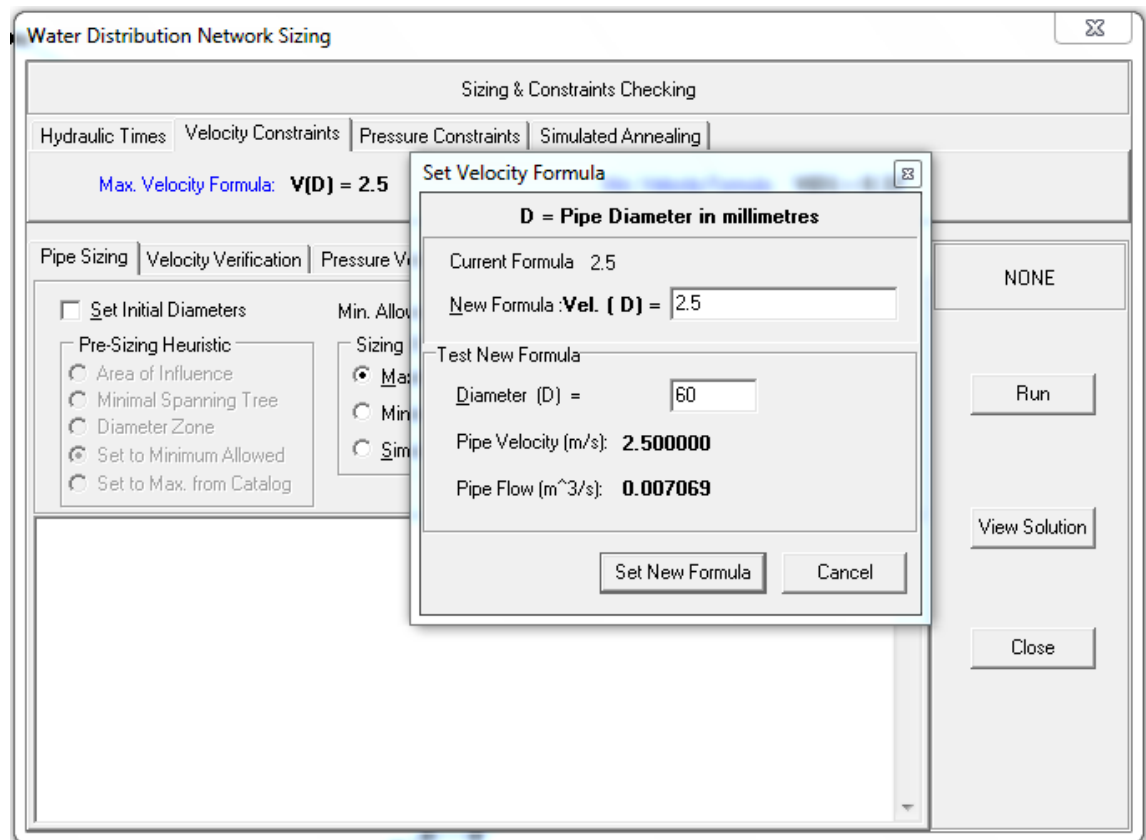


Figura 35. Establecimiento de restricción de máxima velocidad.

Como se puede observar en la parte de test new formula te indica cual sería el caudal para un determinado diámetro de tubería. Puede servir de referencia para establecer uno u otra velocidad máxima.

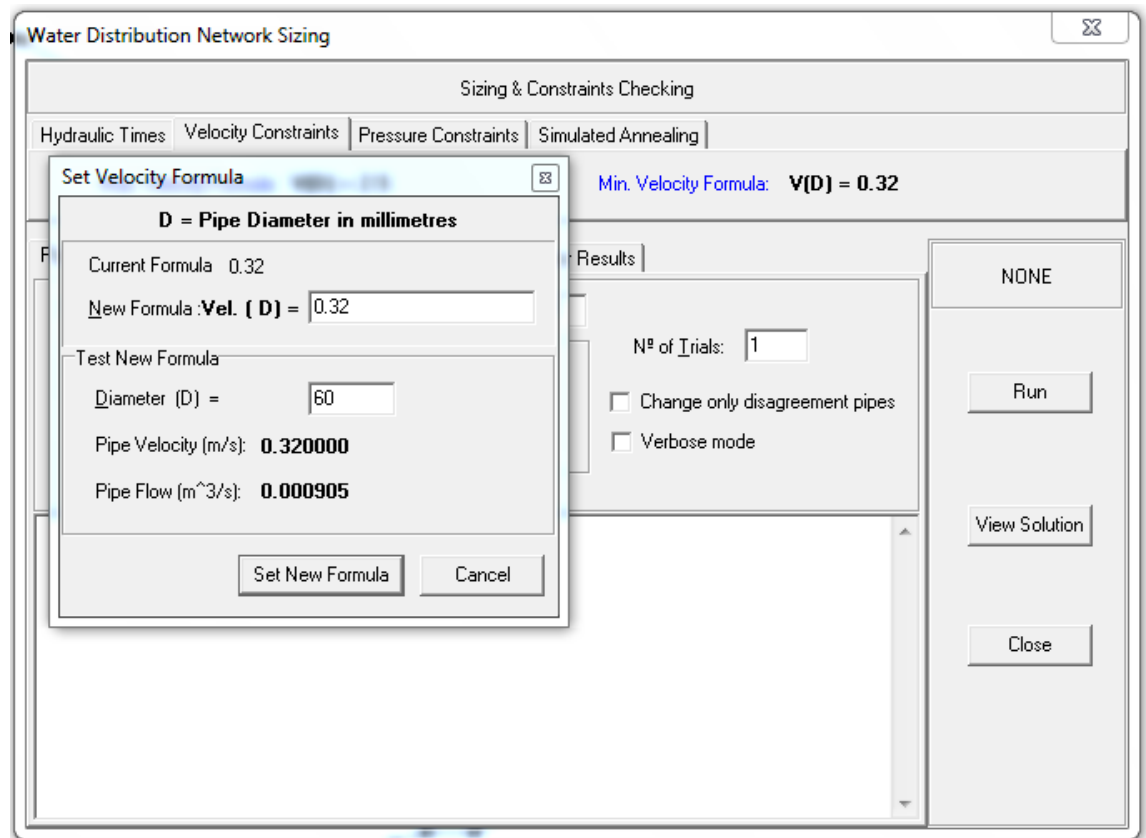


Figura 36. Establecimiento de restricción de mínima velocidad.

### 3.2.7. Pasos del dimensionado óptimo en WaterNetGen.

Una vez realizados los pasos anteriores el programa está preparado para iniciar el cálculo del dimensionado. El cálculo del dimensionado el programa lo divide en tres cálculos. El primero de ellos consiste en solucionar la red únicamente acorde a las restricciones de máxima velocidad, es decir dimensiona la red sin exceder la máxima velocidad en ninguno de los tramos calculados.

Tras esto, y tomando como resultado el propuesto por la el método de Máxima presión, el programa calcula acorde a las restricciones de mínima presión. Por último, una vez que la red está dimensionada respetando las restricciones de máxima velocidad y mínima presión el programa utilizará el algoritmo de recocido simulado (*Simulated Annealing*), explicado en detalle en la introducción en el apartado 2.4 (página 28).

Con este algoritmo de funcionamiento similar a los algoritmos genéticos pero no igual (puesto que realiza mutaciones de datos pero no cruces de datos) se pretende encontrar el coste más económico posible respetando las restricciones.

El motivo fundamental por el que se debe seguir este orden es porque así el algoritmo de recocido simulado no necesita realizar cruces de datos, ya que han sido previamente realizados con el cálculo de Máxima Velocidad y con el de Mínima Presión.

Los pasos a seguir para obtener un dimensionado óptimo con WaterNetGen se muestra de forma más detallada a continuación:

#### **Máxima velocidad**

Lo primero es resolver de acuerdo con la regla de dimensionando (*sizing rule*) de máxima presión. Se ejecuta el programa hasta que converja en un valor. Tras esto se obtendrá una red en la que solamente se han respetado las restricciones de máxima velocidad.

Como podemos observar en la Figura 37, el resultado no ha convergido (aparece un mensaje en amarillo "WARNING"). Por lo tanto debemos seguir ejecutando el programa hasta conseguir que converja.



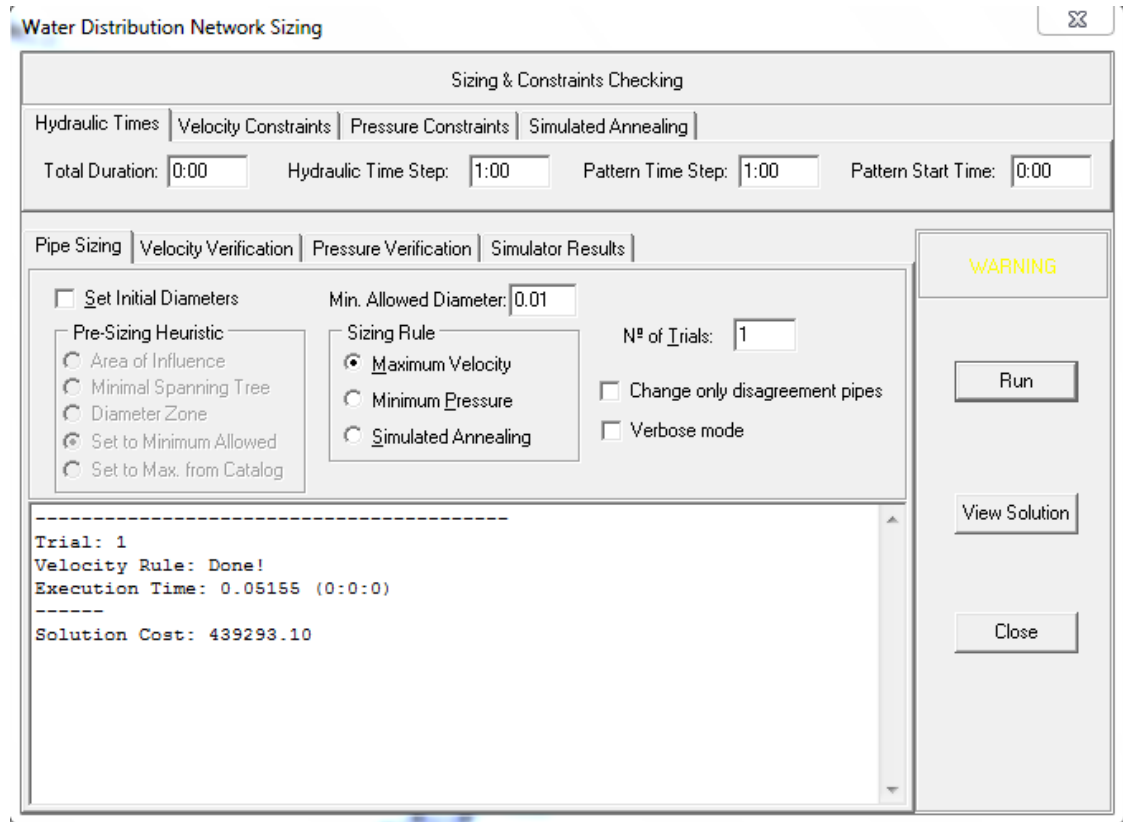


Figura 37. Cálculo no convergente.

El programa debe ser ejecutado tantas veces sea necesario, para ello podemos realizarlo manualmente una por una o utilizar la herramienta *Nº of trials* (Número de intento). En el caso de nuestra red deberemos ejecutar el programa cuatro veces hasta llegar a un resultado óptimo tal y como se muestra en la Figura 38.

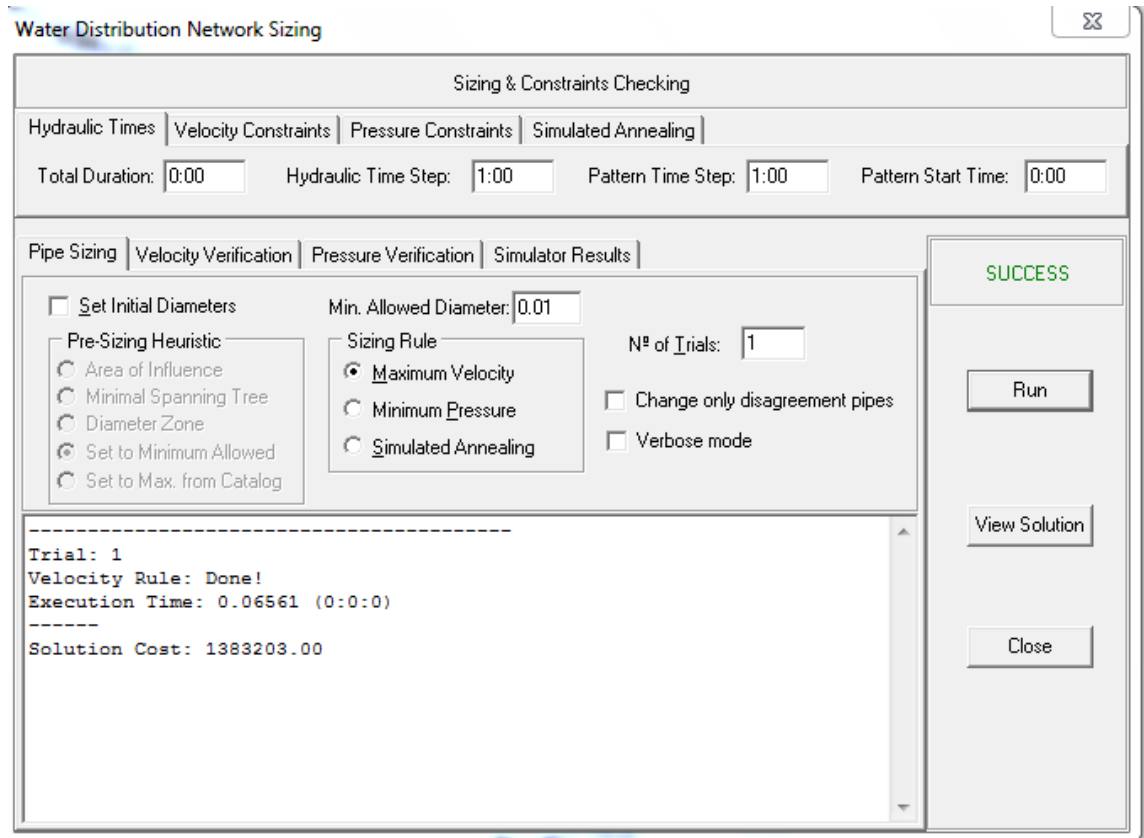


Figura 38. Cálculo convergente acorde al criterio de Máxima Velocidad.

### **Mínima presión**

El siguiente paso por tanto debe ser realizar un dimensionado de la red obtenida que también siga las restricciones de presión mínima. Se le ejecuta el programa hasta obtener un valor fijo, es decir una vez que haya convergido en un punto.

Tras estos dos tipos de dimensionado habremos obtenido una red en la que se respetan las variables hidráulicas que se han fijado como restricciones pero todavía no hemos llegado a la red más barata, es por ello que utilizaremos la simulación de *Annealing*.

Seguimos ejecutando el programa para seguir obteniendo mejoras en la red, es decir hasta el punto que el programa encuentre el mejor coste posible para este algoritmo.

### **Simulación de Annealing**

Como ya se ha comentado este debe ser el último paso para que el dimensionado sea correcto y que el algoritmo puede realizar las llamadas mutaciones, es decir mejorar los datos comparando los que tenía anteriormente.

Este paso requiere en algunas ocasiones de varias horas, esto se debe a que si existen muchos mínimos locales el algoritmo necesita muchas iteraciones para alcanzar el mínimo global.

En la Figura 39 podemos observar una vista global del resultado tras el *Annealing*.

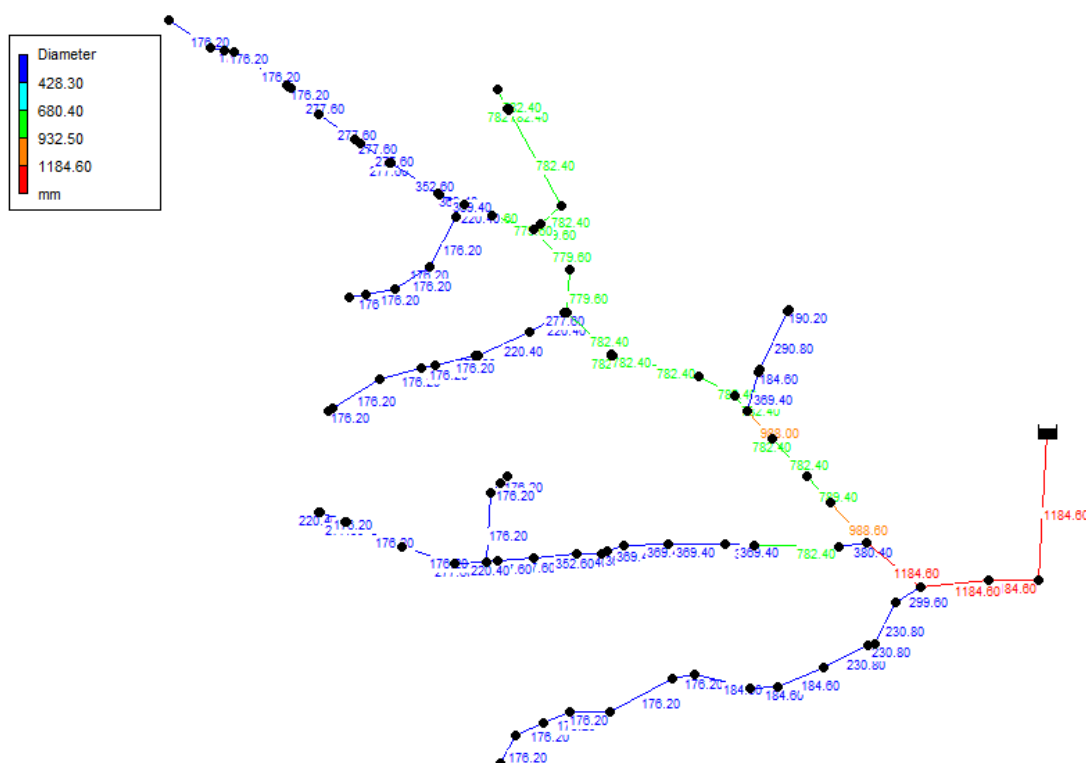
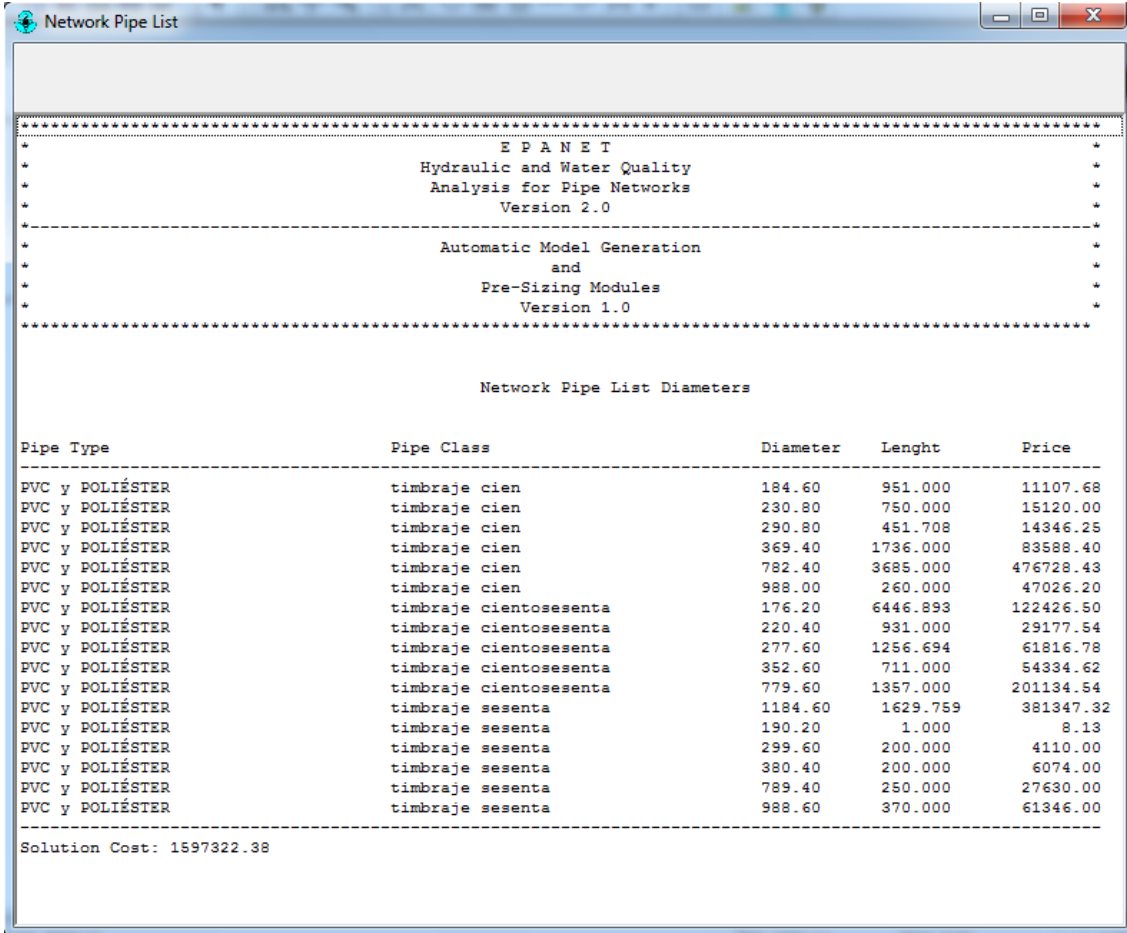


Figura 39. Vista global del resultado tras el *Annealing*.

Para analizar los resultados con más detalle podemos ir a la opción *View Solution* donde veremos unos resultados como los que se muestran en la Figura 40.



Pipe Type	Pipe Class	Diameter	Length	Price
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	184.60	951.000	11107.68
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	230.80	750.000	15120.00
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	290.80	451.708	14346.25
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	369.40	1736.000	83588.40
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	782.40	3685.000	476728.43
PVC y POLIÉSTER	timbraje cien	988.00	260.000	47026.20
PVC y POLIÉSTER	timbraje cientosesenta	176.20	6446.893	122426.50
PVC y POLIÉSTER	timbraje cientosesenta	220.40	931.000	29177.54
PVC y POLIÉSTER	timbraje cientosesenta	277.60	1256.694	61816.78
PVC y POLIÉSTER	timbraje cientosesenta	352.60	711.000	54334.62
PVC y POLIÉSTER	timbraje cientosesenta	779.60	1357.000	201134.54
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	1184.60	1629.759	381347.32
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	190.20	1.000	8.13
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	299.60	200.000	4110.00
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	380.40	200.000	6074.00
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	789.40	250.000	27630.00
PVC y POLIÉSTER	timbraje sesenta	988.60	370.000	61346.00

Solution Cost: 1597322.38

Figura 40. Detalles de las tuberías utilizadas por el programa tras el *Annealing*.

En muchas ocasiones el resultado no es cerrado, es decir el algoritmo puede darte diferentes resultados, el algoritmo nos asegura encontrar uno de los puntos cercanos al valor óptimo pudiendo no ser necesariamente el óptimo.

Como se puede comprobar en la figura 40 mostrada con anterioridad el resultado arrojado por el módulo WaterNetGen no respeta el criterio de

telescopicidad, es por ello que deberemos realizar un ajuste manual de la misma.

### TELESCOPICIDAD

Tras los resultados obtenidos con WaterNetGen podemos comprobar que no se respeta la telescopicidad. Aspecto que deberá ser corregido posteriormente de forma manual. El programa pasa por alto el tema de la telescopicidad ya que en las redes de abastecimiento urbano no es un aspecto a tener en cuenta.

En nuestro caso (una red ramificada de riego) es necesario minimizar el número de elementos reductores y difusores en la red por sus costes. Además dado que los caudales de diseño son telescópicos parece razonable que los diámetros también lo sean.

Las tuberías que no respetan los criterios de telescopicidad serían la TU 79 y la TU38.

Para adecuar nuestra red a los criterios de telescopicidad debemos tener en cuenta los nodos más restrictivos, es decir, aquellos que tras la optimización den una presión muy próxima a la de consigna. Será en estos nodos en los que nos deberemos fijar para saber que nuestra elección ha sido óptima.

Dentro del ramal en el que se encuentra la tubería 79 (TU79) tenemos que considerar los siguientes nodos como nodos de especial atención, puesto que su presión está cercana a la presión de consigna (en el programa indicado como *storeys above ground*):

Nodo 253: tiene presión de consigna 50 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 51.10 m.c.a .

Nodo 2510: tiene presión de consigna 64 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 74.72 m.c.a .

Nodo 258: tiene presión de consigna 53 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 65.01 m.c.a .

Nodo 15: tiene presión de consigna 28 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 28.14 m.c.a .

Nodo 251: tiene presión de consigna 39 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 40.41 m.c.a como se puede comprobar en la Figura 41.

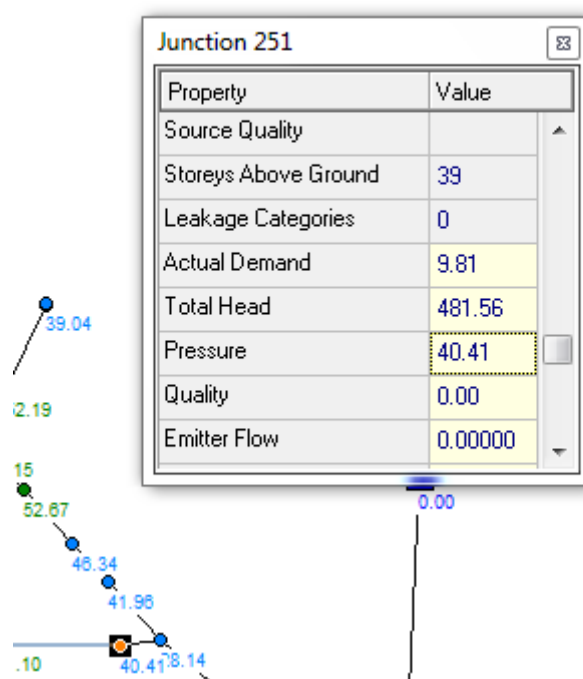


Figura 41. Detalle de la presión de consigna (*Storeys above ground*) y la presión de abastecimiento a la red.

La tubería TU79 es de las englobadas en el tipo b, es decir, de timbraje 100 metros, por lo tanto a lo hora de realizar un cambio de tubería debemos elegir una de las disponibles dentro de ese timbraje (Figura 42). En nuestro caso para respetar telescopicidad tomaremos la inmediatamente inferior que es de 369.4 mm de diámetro puesto que la tubería que se encuentra aguas arriba es de 380.4 mm. De este modo se respeta el criterio de telescopicidad.

Pipe Diameters for Pipe Type/Class :A/b								
Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)
184.60	0.00	11.680				184.60	2.500	0.0669
230.80	0.00	20.160				230.80	2.500	0.1046
290.80	0.00	31.760				290.80	2.500	0.1660
369.40	0.00	48.150				369.40	2.500	0.2679
782.40	0.00	129.370				782.40	2.500	1.2020
988.00	0.00	180.870				988.00	2.500	1.9167
1184.00	0.00	247.840				1184.00	2.500	2.7525
1382.20	0.00	300.420				1382.20	2.500	3.7512

Figura 42. Detalle catálogo de tuberías para timbraje 100 m.

El bajar el diámetro de una tubería siempre nos permite aumentar el de otra, sin un incremento en el total. Tras esta elección se debe comprobar que se de suficiente presión a todos los nodos.

Como podemos observar en la Figura 43, tras este cambio de tubería en el nodo 253 no se está consiguiendo la presión deseada, la presión de consigna es de 50 y la de abastecimiento a ese nodo es de 44.05 m.c.a.

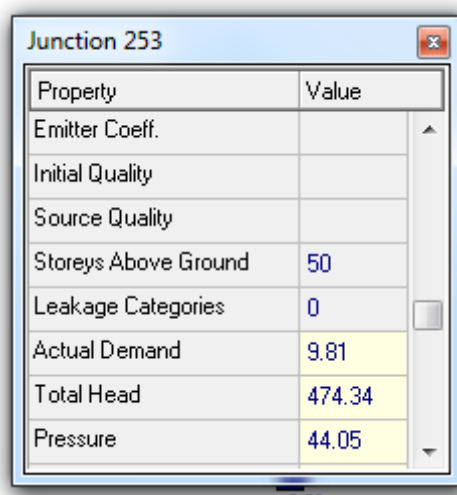


Figura 43. Detalle de insuficiencia de presión en el nodo 253.

El siguiente paso que daremos para tratar de satisfacer tanto los aspectos hidráulicos como los de telescopicidad será aumentar la tubería TU80. Esta tubería pertenece a las catalogadas como tipo a, es decir las de timbraje 60 m (Figura 44), por eso pondremos la inmediatamente superior de nuestra base de datos dentro de ese timbraje. Aumentaremos desde 380.4 mm hasta 789.4 mm.

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m <sup>3</sup> /s)
190.20	0.00	8.130				190.20	2.500	0.0710
237.60	0.00	14.790				237.60	2.500	0.1108
299.60	0.00	20.550				299.60	2.500	0.1762
380.40	0.00	30.370				380.40	2.500	0.2841
789.40	0.00	110.520				789.40	2.500	1.2236
988.60	0.00	165.800				988.60	2.500	1.9190
1184.60	0.00	233.990				1184.60	2.500	2.7553
1382.80	0.00	284.010				1382.80	2.500	3.7545

Figura 44. Tuberías del catálogo pertenecientes al timbraje 60 metros.

Como podemos comprobar con este cambio se ha mejorado la presión pero no lo suficiente como para ser mayor o igual que la de consigna (Figura 45).

Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	50
Leakage Categories	0
Actual Demand	9.81
Total Head	476.50
Pressure	46.21

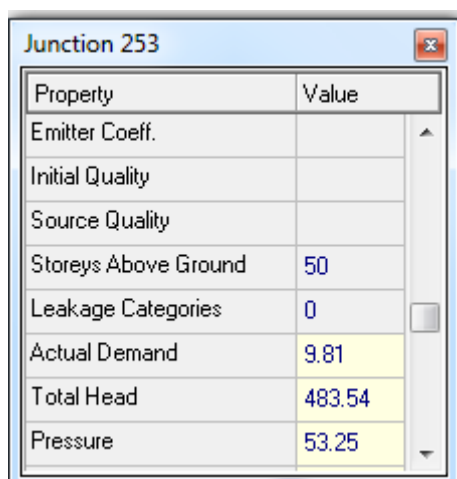
Figura 45. Detalle de insuficiencia de presión en el nodo 253.



Llegados a este punto y viendo que el punto que nos da problemas es el nodo 253 (final de la TU79) lo que haremos será volver al diámetro original de esta tubería (el obtenido de la optimización) y mantener el aumento de diámetro propuesto de la tubería TU80. Con esto conseguiremos respetar la telescopicidad y al tener un diámetro mayor en la tubería TU79 tendremos una menor pérdida de carga con lo que nos resultará más fácil dar la presión suficiente al nodo 253, que era el que creaba el conflicto.

Así pues la tubería TU79 vuelve al diámetro propuesto por el programa, 782.4 mm, y simplemente mantendremos el aumento realizado en la tubería TU80, de 380.4 mm a 789.4 mm.

Una vez realizado el cálculo por el programa podemos comprobar que todos los nodos del ramal satisfacen la presión de consigna, incluido el nodo 253 que dará una presión de 53.25 m.c.a frente a los 50 m.c.a de consigna (Figura 46).



Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	50
Leakage Categories	0
Actual Demand	9.81
Total Head	483.54
Pressure	53.25

Figura 46. Detalle de presión en el nodo 253.

**DETALLE INCREMENTO DE COSTE CON LA TELESCOPICIDAD****Coste adicional del cambio de tuberías**

Se ha realizado un cambio en la tubería TU80, que tiene 200 metros de longitud

-La tubería de diámetro 380.4mm (timbraje 60 m) vale 30.37 euros/metro.

$$30.37 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 200 \text{ metros} = 6074 \text{ euros}$$

-La tubería de diámetro 789.4mm (timbraje 60 m) vale 110.52 euros/metro.

$$110.52 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 200 \text{ metros} = 22104 \text{ euros}$$

Para saber el aumento que supone al precio final el quitar una tubería para poner la otra:

$$22104 \text{ euros} - 6074 \text{ euros} = 16030 \text{ euros}$$

Una vez solucionado el problema de telescopicidad en este ramal de la red pasamos al siguiente punto de conflicto, el de la tubería 38.

Dentro del ramal en el que se encuentra la tubería 38 (TU38) tenemos que considerar los siguientes nodos como nodos de especial atención, puesto que su presión está cercana a la presión de consigna (en el programa indicado como storeys above ground):

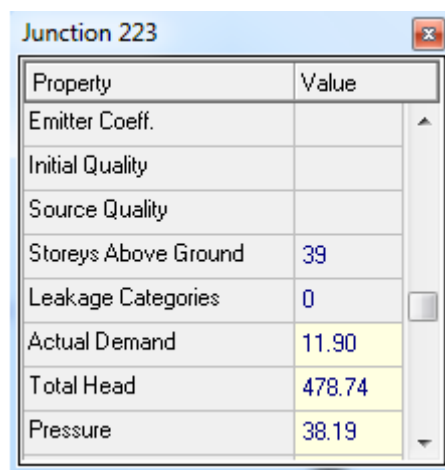
Nodo 223: tiene presión de consigna 39 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 39.04 m.c.a.

Nodo 224: tiene presión de consigna 39 m.c.a y la presión con la que abastece la red es de 39.04 m.c.a.

La tubería TU38 es de las englobadas en el tipo b, es decir, de timbraje 100 m, por lo tanto a lo hora de realizar un cambio de tubería debemos elegir una de las disponibles dentro de ese timbraje. En nuestro caso para respetar

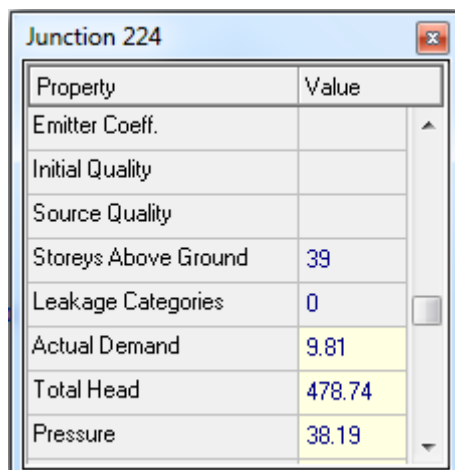
telescopicidad tomaremos la inmediatamente inferior que es de 782.4 mm de diámetro puesto que la tubería que se encuentra aguas arriba es de este mismo diámetro. De este modo se respeta el criterio de telescopicidad.

Con el cambio de tubería realizado respetamos telescopicidad pero no damos suficiente presión a los nodos 223 (Figura 47) y 224 (Figura 48). En ambos conseguimos 38.19 m.c.a frente a los 39 m.c.a requeridos.



Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	39
Leakage Categories	0
Actual Demand	11.90
Total Head	478.74
Pressure	38.19

Figura 47. Detalle de insuficiencia de presión en el nodo 223



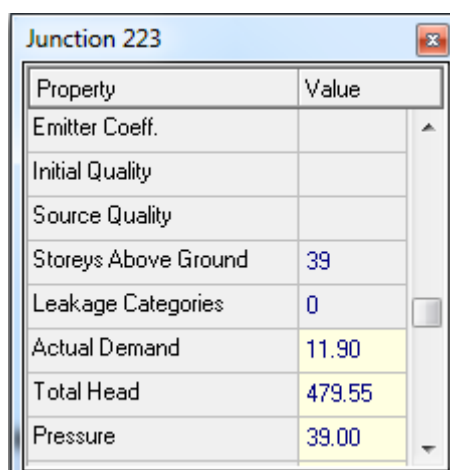
Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	39
Leakage Categories	0
Actual Demand	9.81
Total Head	478.74
Pressure	38.19

Figura 48. Detalle de insuficiencia de presión en el nodo 224

Tras cambiar la tubería TU38 de 988 mm a 782.4 mm de diámetro y ver que no se satisfacen los dos nodos anteriormente citados proponemos un segundo

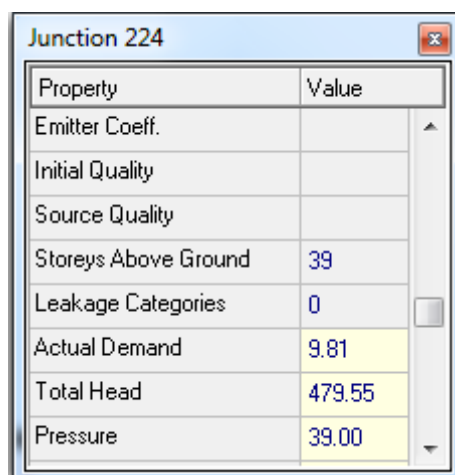
cambio que será el de aumentar el diámetro de la tubería TU59. Esta tubería es del timbraje nombrado como tipo a (de 60 m) por tanto elegimos el diámetro inmediatamente superior 988.6 mm que nos permite mantener la telescopicidad, ya que la tubería aguas arribas tiene el mismo diámetro.

Una vez realizado el cálculo por el programa podemos comprobar que todos los nodos del satisfacen la presión de consigna, incluidos los nodo 223 (Figura 49) y 224 (Figura 50), ambos darán una presión de 39 m.c.a frente a los 39 m.c.a presión de consigna.



Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	39
Leakage Categories	0
Actual Demand	11.90
Total Head	479.55
Pressure	39.00

Figura 49. Detalle de presión en el nodo 223.



Property	Value
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Storeys Above Ground	39
Leakage Categories	0
Actual Demand	9.81
Total Head	479.55
Pressure	39.00

Figura 50. Detalle de presión en el nodo 224.

Coste adicional del cambio de tuberías

Se ha realizado un cambio en la tubería TU38, que tiene 260 m de longitud

-La tubería de diámetro 988mm (timbraje 100 m) vale 180.87 euros/metros

$$180.87 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 260 \text{ metros} = 47026.2 \text{ euros del precio final.}$$

-La tubería de diámetro 782.4mm (timbraje 100 m) vale 129.37 euros/metros

$$129.37 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 260 \text{ metros} = 33636.2 \text{ euros cuesta esta nueva tubería}$$

En este caso la diferencia entre el precio de la tubería que teníamos y el de la que ponemos en sustitución supondrá el ahorro a descontar del total:

$$47026.2 \text{ euros} - 33636.2 \text{ euros} = 13390 \text{ euros de ahorro}$$

$$-13390 \text{ euros a descontar del total}$$

Se ha realizado un cambio en la tubería TU59, que tiene 250 m de longitud

-La tubería de diámetro 789.4mm (timbraje 60 m) vale 110.52 euros/metro

$$110.52 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 250 \text{ metros} = 27630 \text{ euros del precio final}$$

-La tubería de diámetro 988.6mm (timbraje 60 m) vale 165.8 euros/m

$$165.8 \frac{\text{euros}}{\text{metro}} \cdot 250 \text{ metros} = 41450 \text{ euros cuesta esta nueva tubería}$$

Para saber el aumento que supone al precio final el quitar una tubería para poner la otra:

$$41450 \text{ euros} - 27630 \text{ euros} = 13820 \text{ euros adicionales al total}$$

Coste total adicional, considerando todos los cambios en la red:

$$16030 \text{ euros} - 13390 \text{ euros} + 13820 \text{ euros} = 16460 \text{ euros adicionales al total}$$

Sabiendo que el coste total de la red era de 1597322.38 euros sumamos los costes adicionales totales a esta cifra y tendremos el coste final de la red respetando los criterios de telescopicidad.

$$1597322.38 \text{ euros} + 16460 \text{ euros} = \mathbf{1613782.38 \text{ euros}}$$

\*El programa calcula automáticamente el incremento del precio con cualquier cambio manual de tubería.

### 3.3. NUEVE REDES

Se trabajará con las nueve redes reales extraídas de un estudio comparativo entre el dimensionado recursivo y el método de la serie económica (González-Cebollada, 2008; González-Cebollada et al., 2011). Se muestran a continuación.

#### Red 1

Esta red está formada por 115 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 611 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.39 m/s y la máxima en 2.5 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 51.

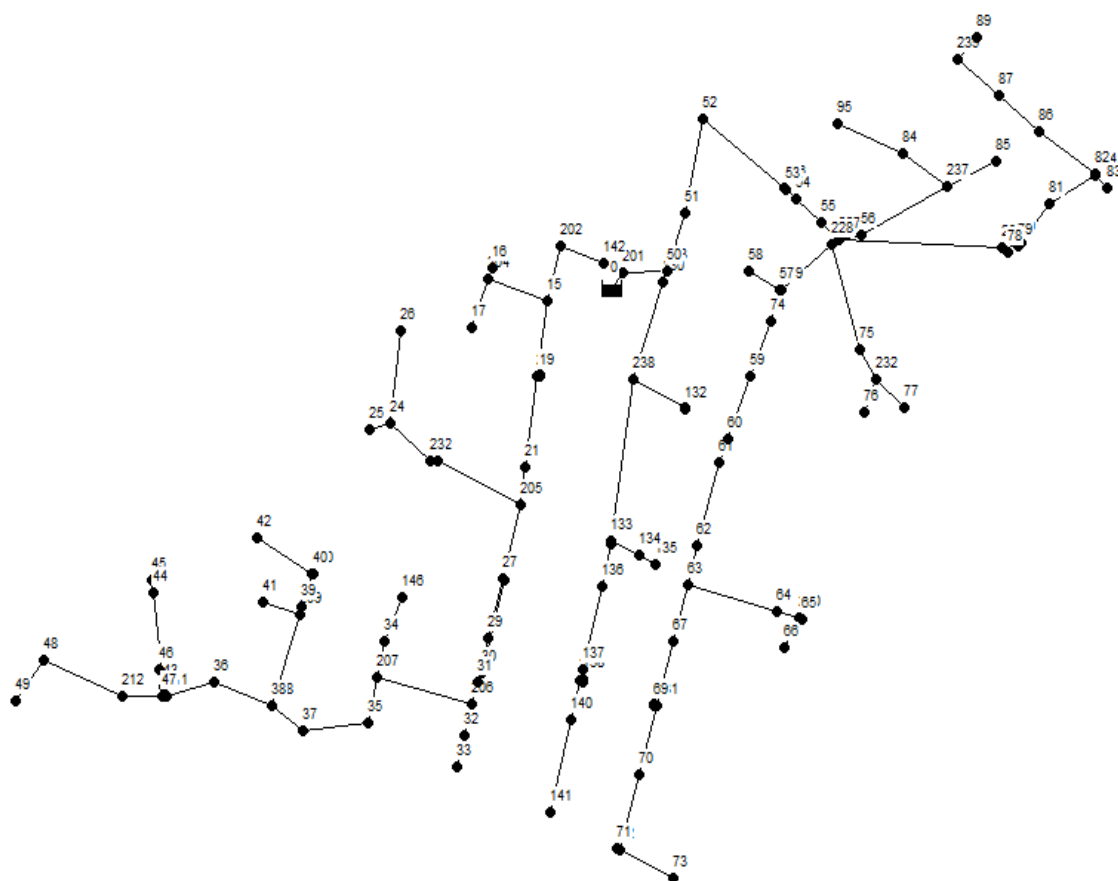


Figura 51. Disposición de la red 1 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 5 del ANEXO 2 (página 18 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 14 del ANEXO 3 (página 42 ANEXOS).



### Red 4

Esta red está formada por 80 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 614 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.5 m/s y la máxima en 2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 52.

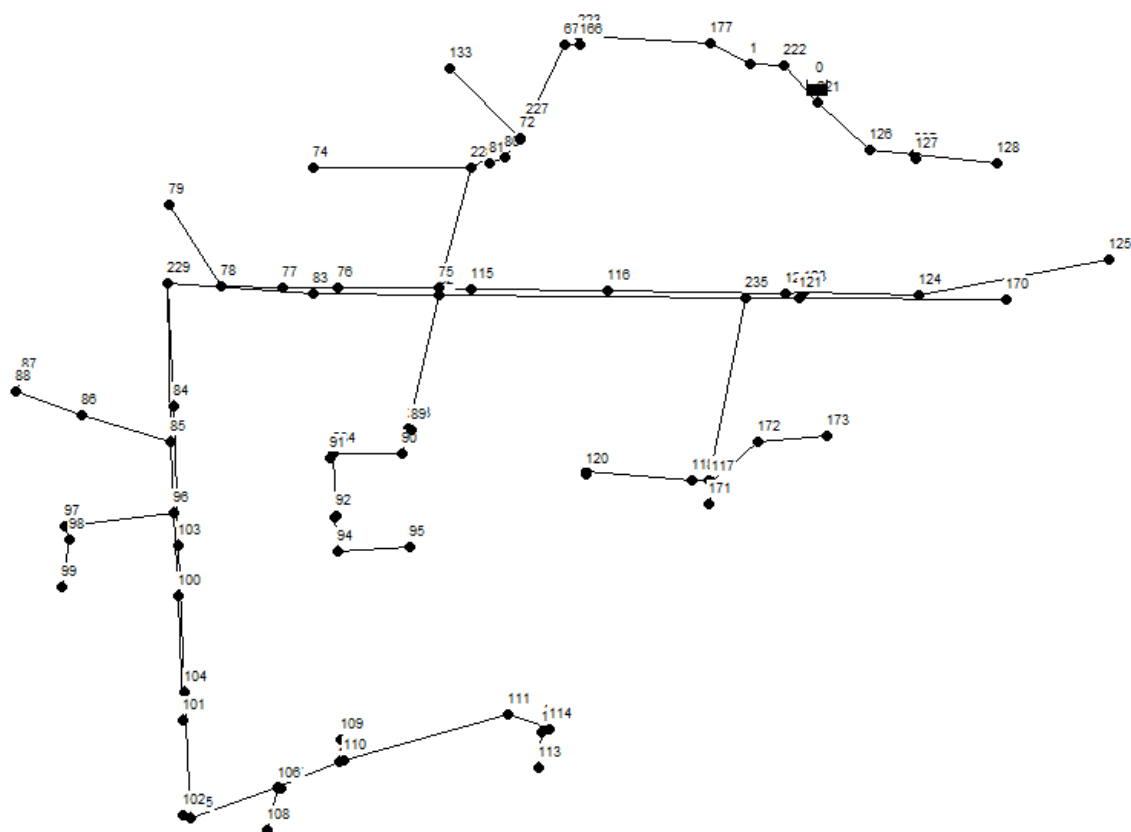


Figura 52. Disposición de la red 4 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 6 del ANEXO 2 (página 21 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 15 del ANEXO 3 (página 45 ANEXOS).

**Red 5**

Esta red está formada por 119 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 582.11 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.39 m/s y la máxima en 2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 53.



Figura 53. Disposición de la red 5 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 7 del ANEXO 2 (página 23 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 16 del ANEXO 3 (página 47 ANEXOS).

**Red 6**

Esta red está formada por 119 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 582.11 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.39 m/s y la máxima en 2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 54.

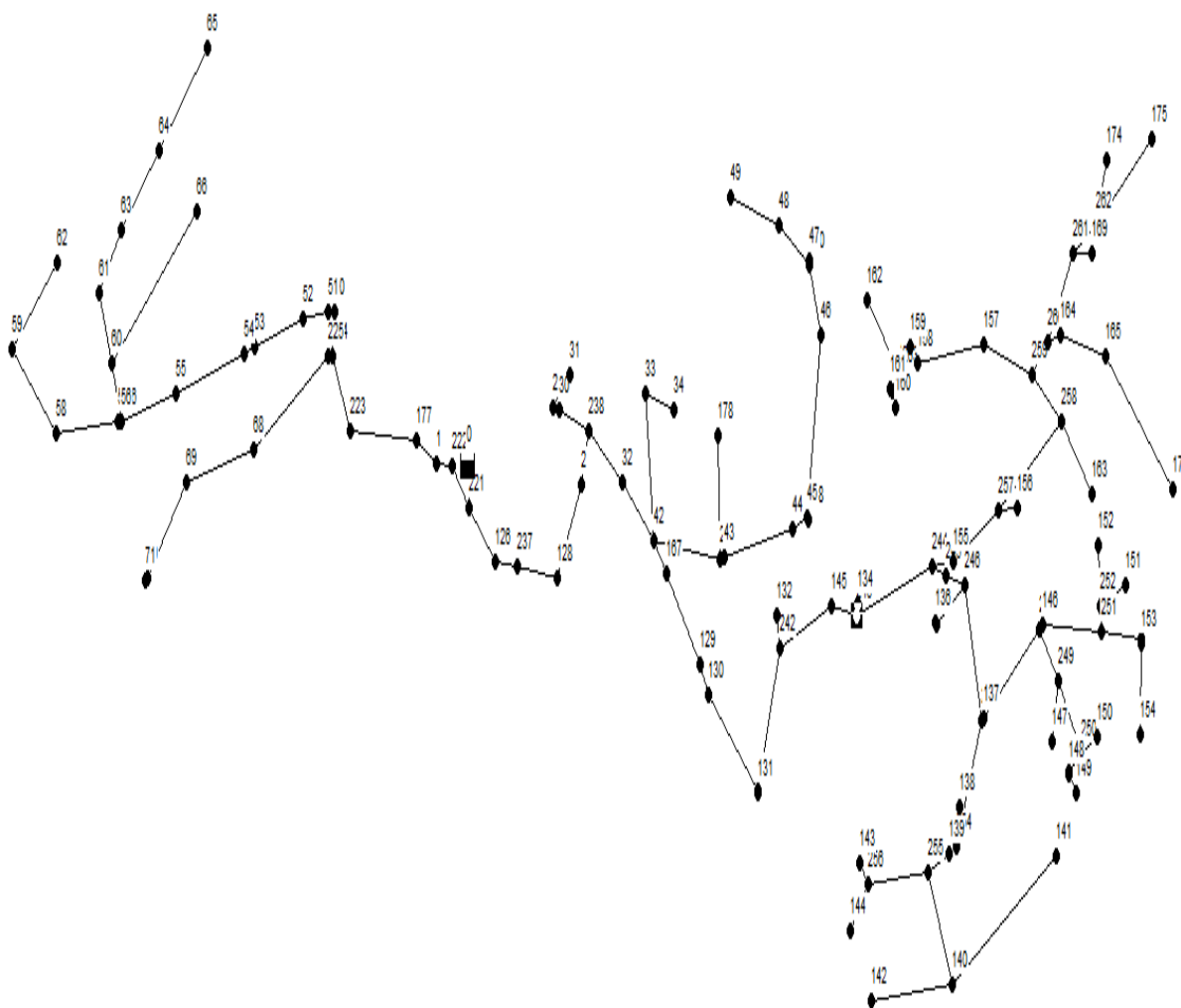


Figura 54. Disposición de la red 6 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 8 del ANEXO 2 (página 26 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 17 del ANEXO 3 (página 50 ANEXOS).

**Red 7**

Esta red está formada por 49 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 534 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.5 m/s y la máxima en 2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 55.

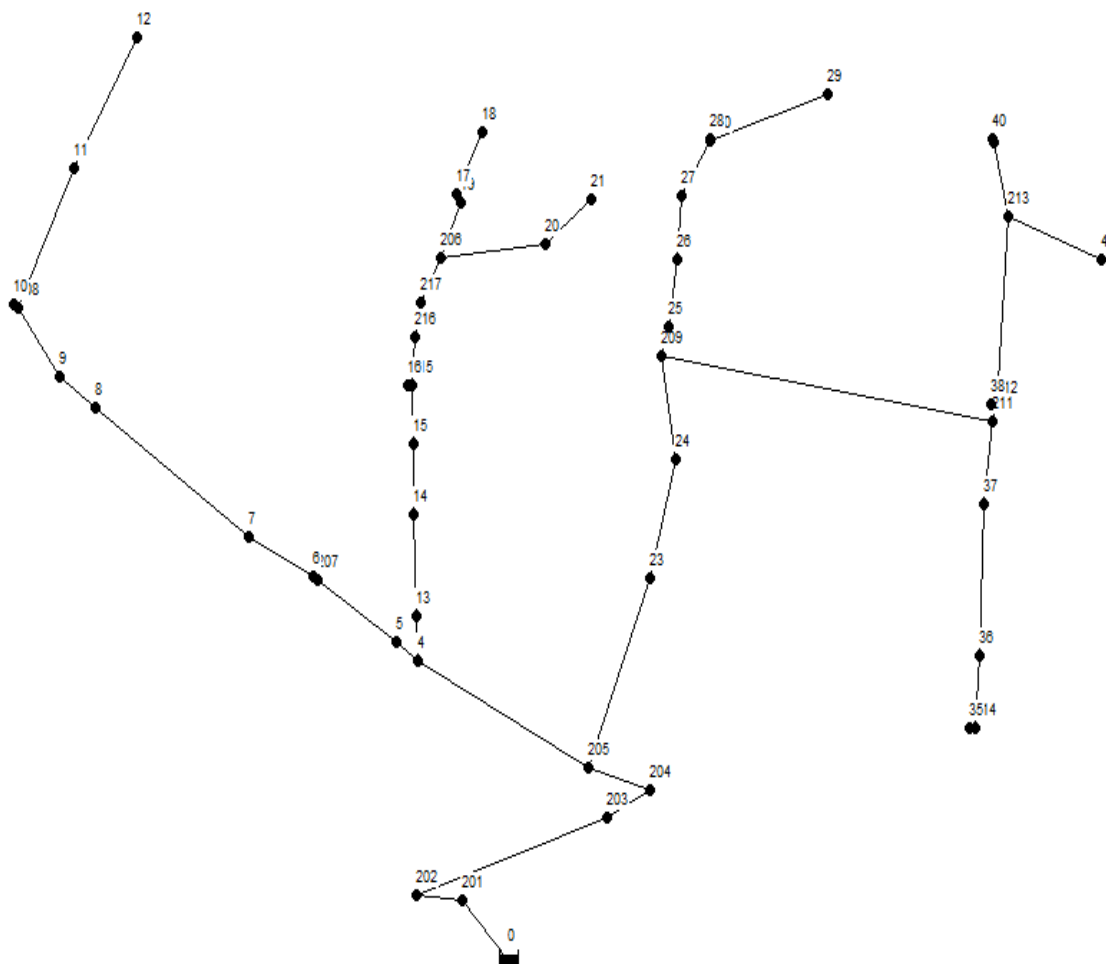


Figura 55. Disposición de la red 7 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 9 del ANEXO 2 (página 29 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 18 del ANEXO 3 (página 53 ANEXOS).

**Red 11**

Esta red está formada por 53 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 592 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.5 m/s y la máxima en 2.5 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 56.

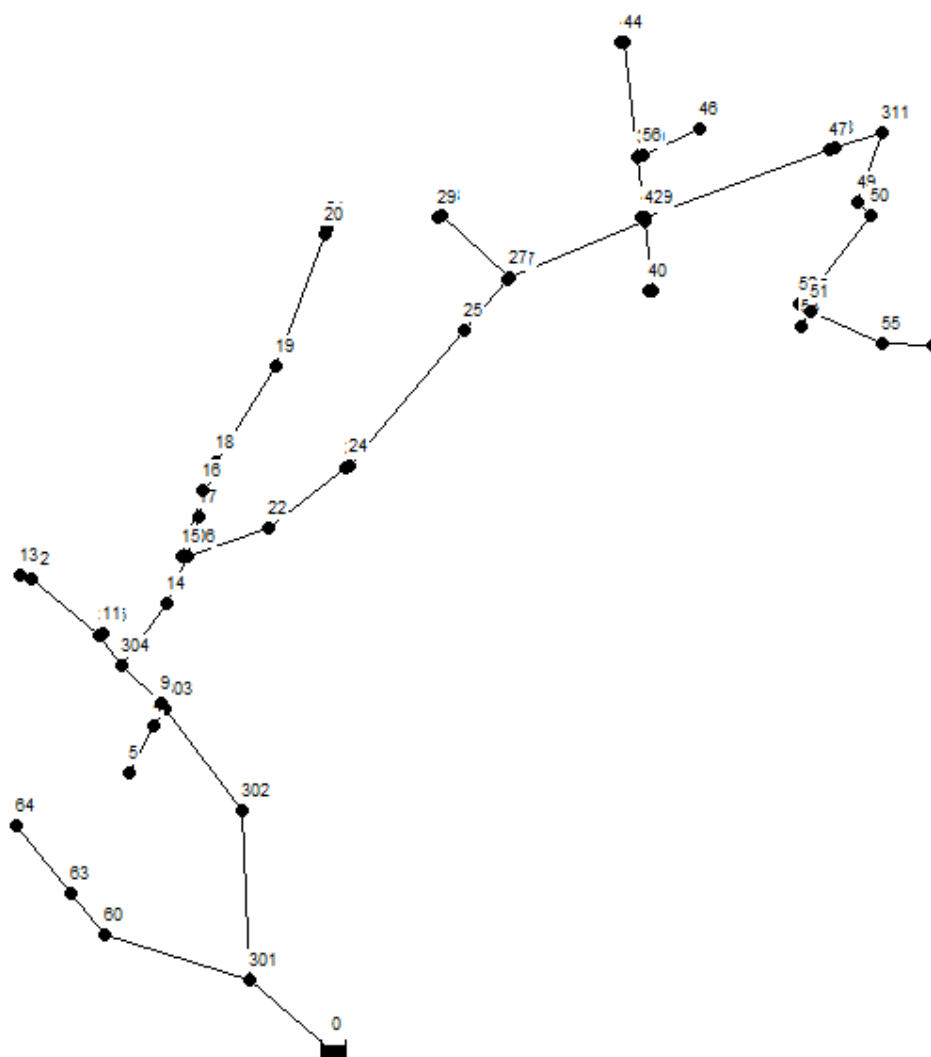


Figura 56. Disposición de la red 11 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 10 del ANEXO 2 (página 31 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 19 del ANEXO 3 (página 55 ANEXOS).

**Red 13**

Esta red está formada por 76 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 418 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.4 m/s y la máxima en 2.2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 57.

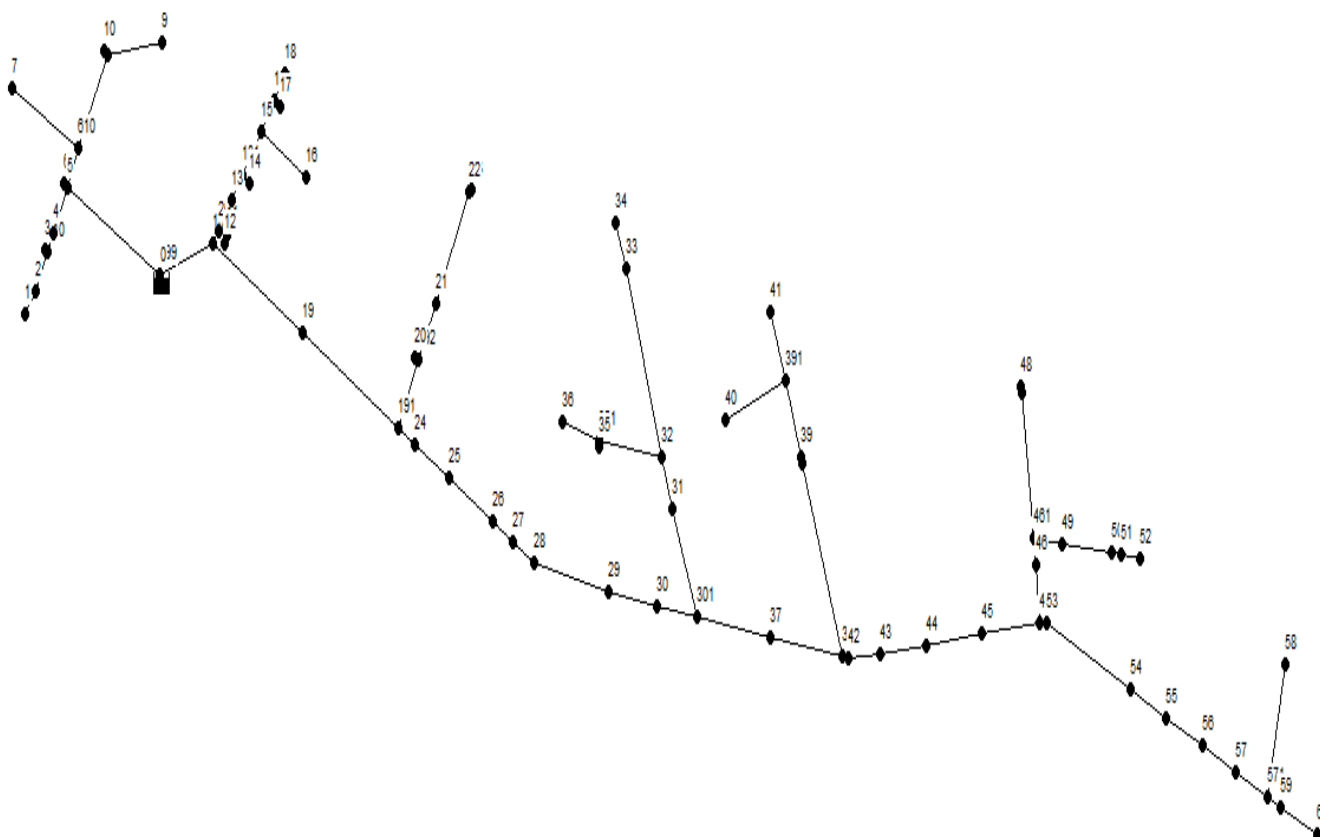


Figura 57. Disposición de la red 13 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 11 del ANEXO 2 (página 33 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 20 del ANEXO 3 (página 57 ANEXOS).



**Red 14**

Esta red está formada por 87 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 411 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.764 m/s y la máxima en 2.2 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 58.

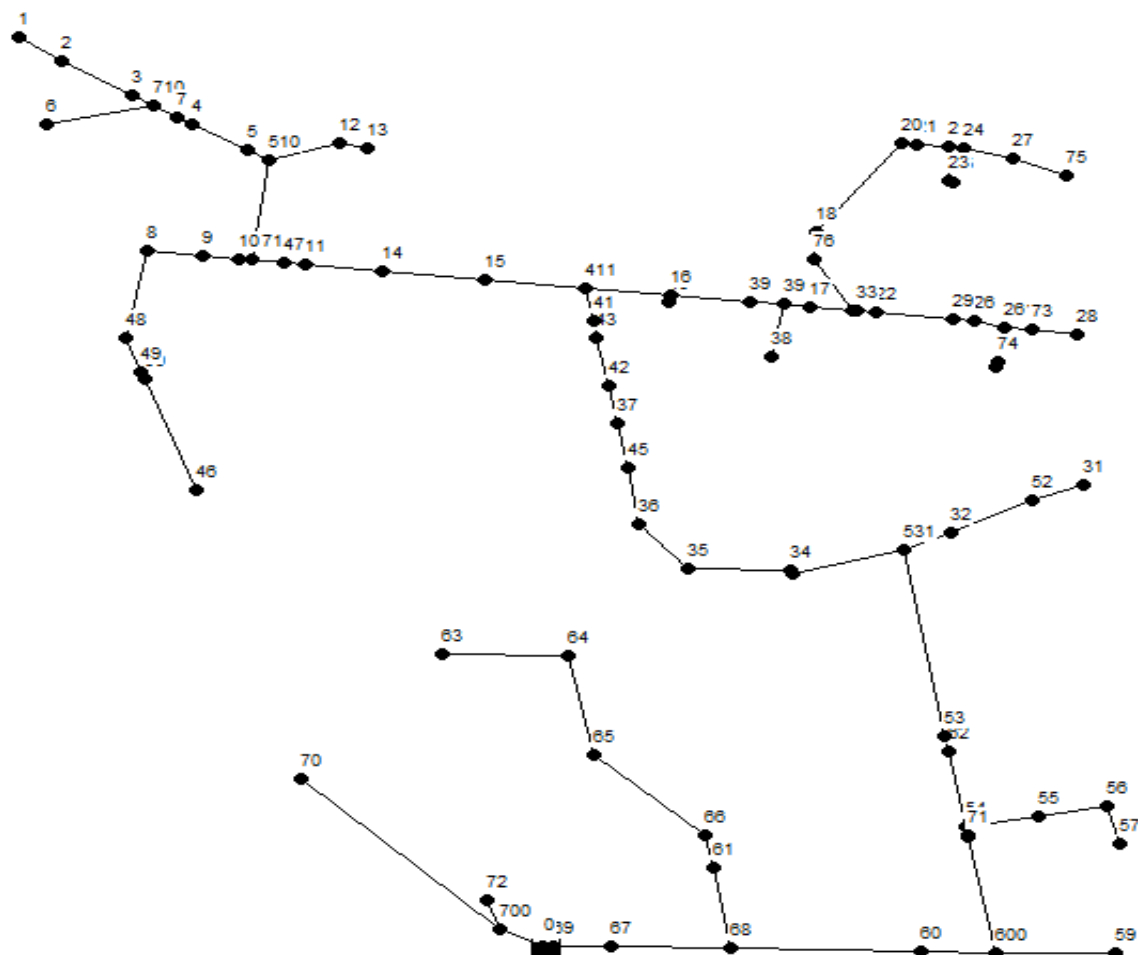


Figura 58. Disposición de la red 14 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 12 del ANEXO 2 (página 35 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 21 del ANEXO 3 (página 59 ANEXOS).

**Red 15**

Esta red está formada por 128 tramos. La altura de cabecera que estableceremos es 403 metros. La velocidad mínima que se establece en 0.3 m/s y la máxima en 2.331 m/s. La disposición de la red se muestra a continuación en la Figura 59.

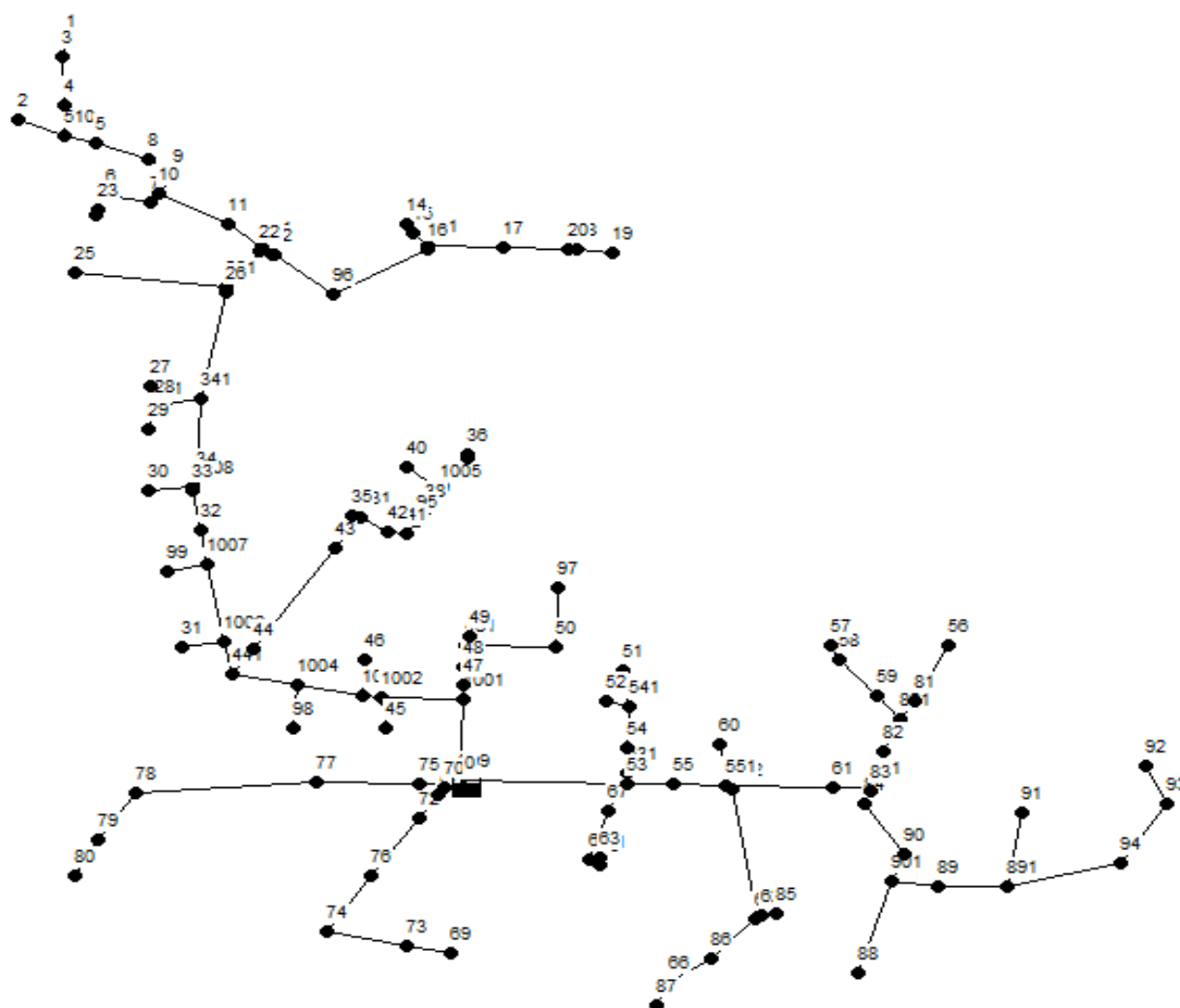


Figura 59. Disposición de la red 15 en WaterNetGen.

Las presiones correspondientes a los nodos de esta red son las que se muestran en la Tabla 13 del ANEXO 2 (página 38 ANEXOS).

La asignación de tuberías realizada por WaterNetGen tras seguir los procesos de cálculo desarrollados en el apartado 3.2 de la METODOLOGÍA se muestran en la Tabla 22 del ANEXO 3 (página 62 ANEXOS).

## 4. RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS RED DE PRUEBA

En el dimensionado de esta red de prueba la diferencia entre el dimensionado con WaterNetGen y con el Método de la Serie Económica es muy pequeña, siendo de 433.5 euros. Los resultados del dimensionado de ambos métodos se muestran en la Tabla 60 que sigue a continuación.

	<b>COSTE (euros)</b>
<b>WaterNetGen</b>	46309.5
<b>Método Serie Económica</b>	46743

Tabla 60. Resultados dimensionado red de prueba.

Como se puede observar en la Tabla 61, las diferencias entre el dimensionado realizado por el módulo WaterNetGen y el Método de la serie económica es que en la tubería 1 WaterNetGen pone una tubería de 506.6 mm en vez de la de 570 mm y en la tubería cuatro pone una tubería de 321.2 mm en vez de la de 361.8 mm.

	DIÁMETRO WaterNetGen (mm)	DIÁMETRO Método Serie Económica (mm)
<b>TUBERÍA 1</b>	506.6	570
<b>TUBERÍA 2</b>	506.6	506.6
<b>TUBERÍA 3</b>	361.8	361.8
<b>TUBERÍA 4</b>	321.2	361.8
<b>TUBERÍA 5</b>	226.2	226.2

Tabla 61. Comparativa tuberías por diferentes métodos.

A continuación en el gráfico 62 se muestra una comparativa de los resultados de la red de prueba con diferentes métodos de dimensionado de redes.

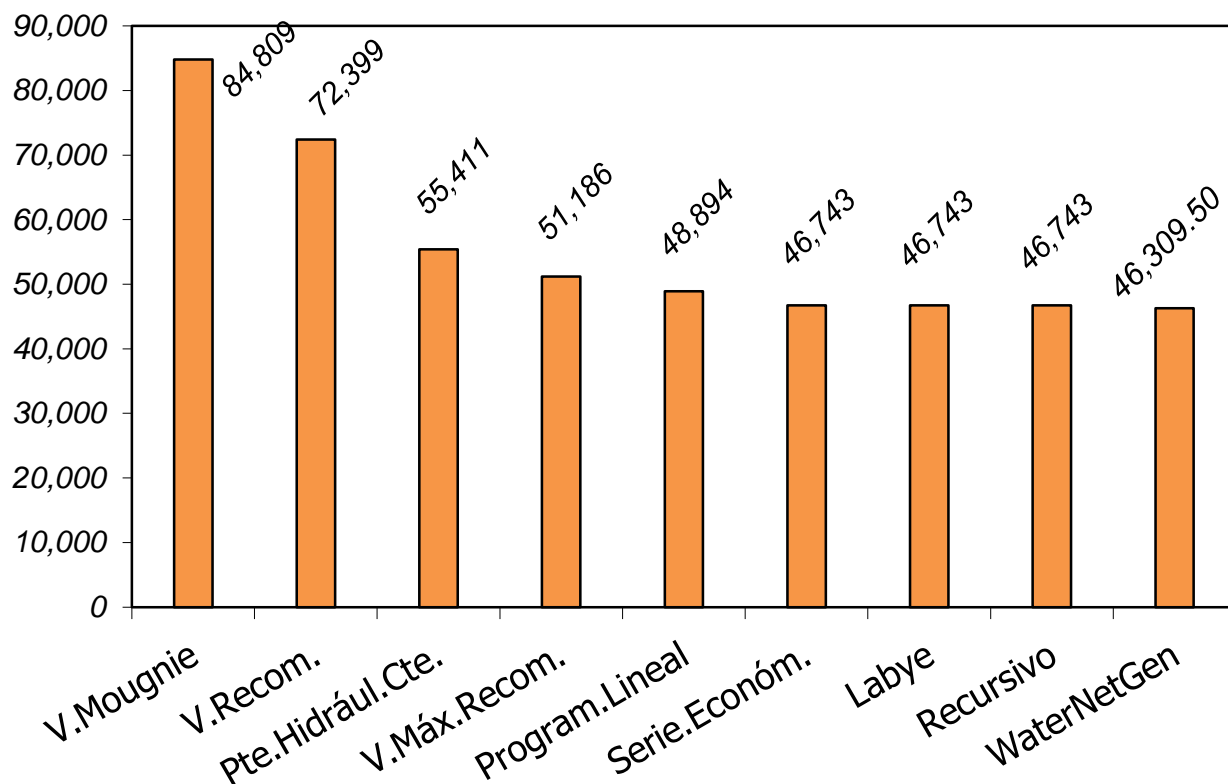


Gráfico 62. Comparativa de costes red de prueba con otros métodos de dimensionado.

## 4.2. RESULTADOS RED FONZ

Una vez el programa ha dimensionado la red y nosotros manualmente hemos realizado un ajuste de telescopicidad pasaremos a realizar una comparativa entre los resultados antes y después de este ajuste.

El resultado tras el dimensionado realizado por el módulo WaterNetGen es de 1597322 euros y tras su posterior ajuste manual a los criterios de telescopicidad asciende a **1613782.38 euros**.

Tras la obtención de resultados es necesario realizar con las herramientas de Verificación de Velocidad y Verificación de Presión (Velocity Verification y Pressure Verification) un análisis detallado de cuáles pueden ser los resultados contradictorios o fuera de las restricciones. En este caso:

En la tubería TU 13 no se respeta la restricción de mínima velocidad fijada en 0.32 m/s, apareciendo en dicha tubería una velocidad de 0.24 m/s.

Por otra parte encontramos que en la tubería TU100 la máxima velocidad es coincidente con la restricción de máxima velocidad.

Estos resultados no suponen un problema a considerar para el buen funcionamiento hidráulico de la red ya que en ninguna tubería de la red se supera la restricción de velocidad máxima y en todos nodos se satisfacen las presiones de consigna.



### **COMPARATIVA CON GESTAR**

El programa GESTAR (Aliod et al. 1997, Aliod y González 2007), es un paquete de simulación de sistemas presurizados de distribución de fluidos orientado al diseño, análisis y gestión de sistemas de riego. GESTAR aborda la simulación hidráulica de redes presurizadas en régimen estacionario en el contexto de los sistemas de riego utilizando procedimientos numéricos avanzados, que se conjugan eficazmente con un “interface” gráfico.

El coste final de la red asciende a **1613460 euros** mediante el método de la Serie Económica implementado con la herramienta informática GESTAR.

La diferencia entre ambos métodos, como se puede comprobar en la Tabla 63, es muy pequeña, tan solo suponiendo un ahorro de 322.38 euros a favor de GESTAR.

	<b>COSTE (euros)</b>
<b>WaterNetGen (no telescópico)</b>	1597322
<b>WaterNetGen (telescópico)</b>	1613782.38
<b>GESTAR</b>	1613460

Tabla 63. Diferencia de costes con WaterNetGen y GESTAR, red de Fonz.

En el gráfico 64 mostrado a continuación se puede observar una comparativa de los resultados de la red de Fonz con diferentes métodos de dimensionado de redes.

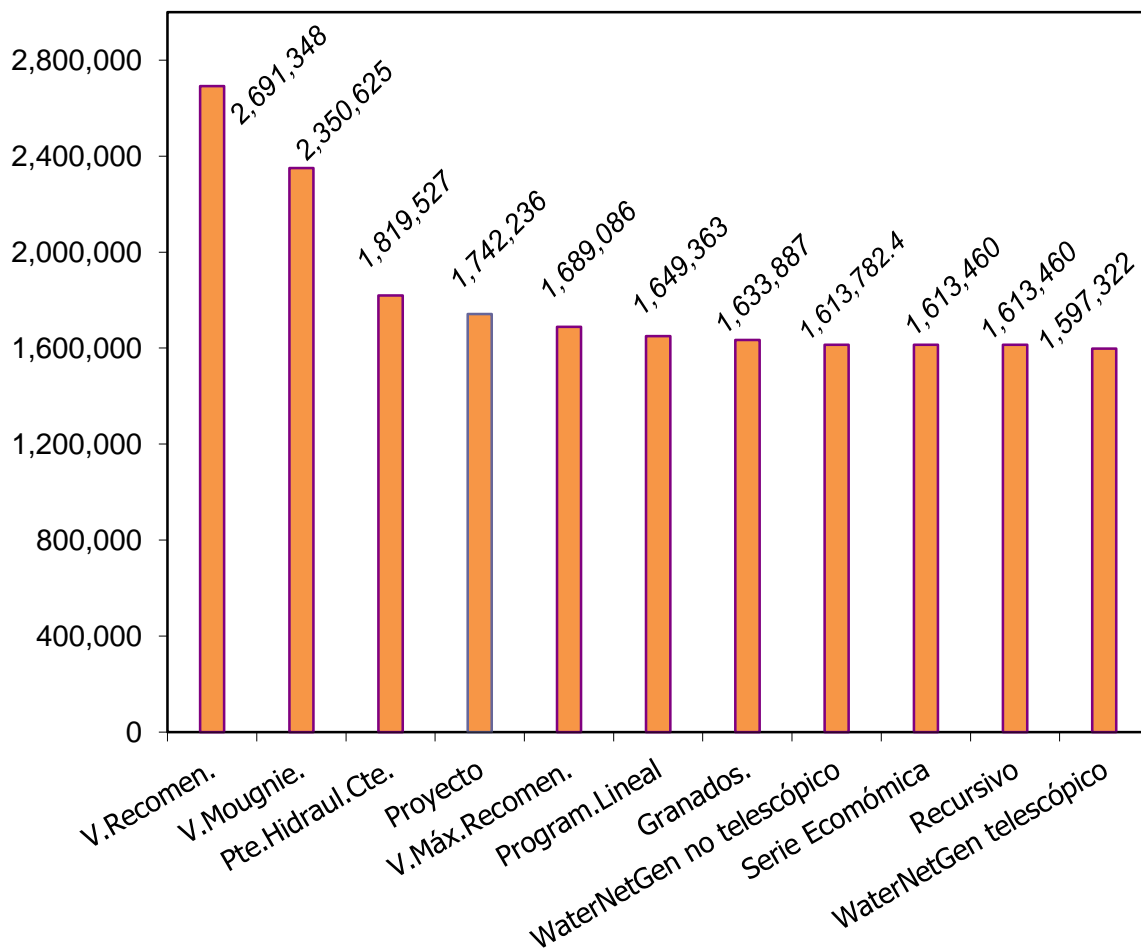


Gráfico 64. Comparativa de costes red de Fonz con otros métodos de dimensionado.

### 4.3. RESULTADOS NUEVE REDES

Tras dimensionar el conjunto de las redes anteriormente presentadas hay que realizar un ajuste manual de la telescopicidad puesto que el programa no respeta este criterio. Es por este motivo por el que presentaremos dos tipos de resultados: antes del ajuste de telescopicidad (tal y como dimensiona el programa) y después del ajuste. En las comparaciones se mostrarán las diferencias con el método anteriormente usado de la Serie Económica implementado con el programa GESTAR y se introducirá una nueva comparativa con el método recursivo.

En un primer dimensionado y sin respetar los criterios de telescopicidad encontramos las diferencias de costes que se muestran a continuación en la Tabla 65. En la Tabla 66 podemos observar los costes tras el ajuste manual de telescopicidad.

Los porcentajes positivos indican el tanto por ciento en los que los dimensionados por el método recursivo o por GESTAR producen un ahorro de los costes.

Así pues los porcentajes que aparezcan con valores negativos indican el tanto por ciento en el que el dimensionado con el módulo WaterNetGen producen un ahorro de los costes. Todos los costes de las Tablas 65 y 66 mostradas a continuación vienen expresados en euros.

RED	COSTE WATERNETGEN	COSTE RECURSIVO	COSTE GESTAR	Porcentaje recursivo	Porcentaje GESTAR	Diferencia coste recursivo	Diferencia coste GESTAR
1	945381.85	962989.25	964599.17	-1.83	-1.99	-17607.4	-19217.32
4	690646.03	676999.69	678500.5	2.02	1.79	13646.34	12145.53
5	1412852.93	1437722.06	1380009.6	-1.73	2.38	-24869.13	32843.33
6	1475405	1462333.23	1475111.9	0.89	0.02	13071.77	293.1
7	355569.35	355085.43	358054.64	0.14	-0.69	483.92	-2485.29
11	768807.99	756258.19	768145.95	1.66	0.09	12549.8	662.04
13	1799053	1796395.92	1825435.44	0.15	-1.45	2657.08	-26382.44
14	3554286.29	3630662.06	3626446.43	-2.1	-1.99	-76375.77	-72160.14
15	2332700.85	2311487.85	2384549.85	0.92	-2.17	21213	-51849

Tabla 65. Comparativa de costes respecto a WaterNetGen no telescópico.

RED	COSTE WATERNETGEN (telescopico)	COSTE RECURSIVO	COSTE GESTAR	Porcentaje recursivo	Porcentaje GESTAR	Diferencia coste recursivo	Diferencia coste GESTAR
1	946541.92	962989.25	964599.17	-1.71	-1.87	-16447.33	-18057.25
4	692347.08	676999.69	678500.5	2.27	2.04	15347.39	13846.58
5	1420078.63	1437722.06	1380009.6	-1.23	2.9	-17643.43	40069.03
6	1477996.02	1462333.23	1475111.9	1.07	0.2	15662.79	2884.12
7	360591.73	355085.43	358054.64	1.55	0.71	5506.3	2537.09
11	778402.19	756258.19	768145.95	2.93	1.34	22144	10256.24
13	1803797.68	1796395.92	1825435.44	0.41	-1.19	7401.76	-21637.76
14	3554995.77	3630662.06	3626446.43	-2.08	-1.97	-75666.29	-71450.66
15	2332700.85	2311487.85	2384549.85	0.92	-2.17	21213	-51849

Tabla 66. Comparativa de costes respecto a WaterNetGen telescópico.

### **RESPECTO AL MÉTODO RECURSIVO**

Como se puede observar en la Tabla 65 en la comparativa de costes con el método recursivo podemos observar que las redes 1, 5 y 14 son más baratas con el resultado ofrecido por el módulo WaterNetGen.

En las redes 4, 6, 7, 11, 13 y 15 el método recursivo consigue un ahorro mayor respecto al módulo WaterNetGen.

Tras el ajuste manual de telescopicidad se sigue manteniendo el ratio de redes que salen más baratas con WaterNetGen que con el método recursivo.

### **RESPECTO A GESTAR**

Como se puede observar en la Tabla 65 en la comparativa de costes con el programa de cálculo hidráulico GESTAR podemos observar que las redes 1, 7, 13, 14 y 15 son más baratas con el resultado ofrecido por el módulo WaterNetGen.

En contraposición tenemos las redes 4, 5, 6 y 11 GESTAR consigue un ahorro mayor respecto al módulo WaterNetGen.

En este caso al realizar los ajustes manuales de telescopicidad hemos incrementado el precio de la red 7 quedando así como redes más baratas por el módulo WaterNetGen: las redes 1, 13, 14 y 15.

En el Gráfico 67 mostrado a continuación podemos observar las diferencias de costes de WaterNetGen, tanto telescópico como no telescópico, con el Método Recursivo y el Método de la Serie Económica (GESTAR).

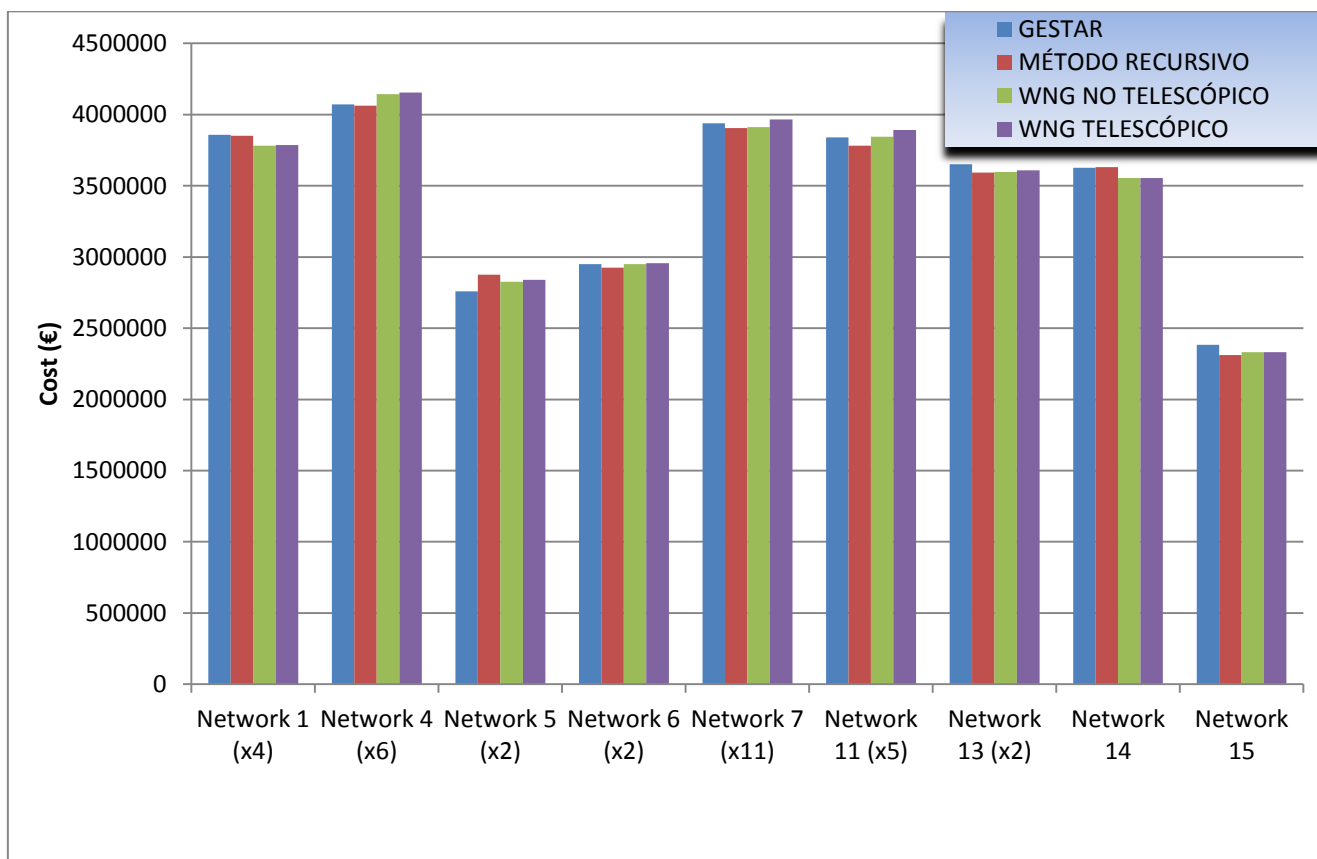


Gráfico 67. Gráfico de barras de las nueve redes dimensionadas. Comparación entre métodos.

### **Análisis de resultados de WaterNetGen**

Tras los resultados vertidos por el programa hay que realizar una comprobación mediante la herramienta que el módulo WaterNetGen tiene para este tipo de chequeos: Verificación de Velocidad y Verificación de Presión (Velocity Verification y Pressure Verification). Con esto nos aseguraremos de que el dimensionado realizado por el programa haya respetado las restricciones de velocidad y presión establecidas.

En la red cinco en la tubería TU93 tras el dimensionado encontramos un resultado que no está dentro de los límites de las restricciones. En esta tubería

aparece una velocidad de 0.31 m/s siendo la restricción de velocidad mínima de 0.39 m/s.

En la red seis en la tubería TU93 tras el dimensionado encontramos un resultado que no está dentro de los límites de las restricciones. En esta tubería aparece una velocidad de 0.48 m/s siendo la restricción de velocidad mínima de 0.5 m/s.

En la red siete en la tubería TU45 tras el dimensionado encontramos un resultado que no está dentro de los límites de las restricciones. En esta tubería aparece una velocidad de 0.4 m/s siendo la restricción de velocidad mínima de 0.5 m/s.

En la red once en la tubería TU52 tras el dimensionado encontramos un resultado que no está dentro de los límites de las restricciones. En esta tubería aparece una velocidad de 0.25 m/s siendo la restricción de velocidad mínima de 0.5 m/s.

En la red catorce en la tubería TU73 tras el dimensionado encontramos un resultado que no está dentro de los límites de las restricciones. En esta tubería aparece una velocidad de 0.57 m/s siendo la restricción de velocidad mínima de 0.76 m/s.

Podemos considerar que estos incumplimientos no afectan de forma significativa al buen funcionamiento de las redes, puesto que se cumplen las restricciones de velocidad máxima y las de presión mínima en todos nodos de las redes.

## 5. DISCUSIÓN



Respecto a otros métodos, como el Método de la Serie Económica o el Método Recursivo, el módulo WaterNetGen plantea problemas como los encontrados con la telescopicidad ya que en las redes de abastecimiento urbano no es algo a tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo.

Puede suponer una tarea compleja el cambio manual de las tuberías tras el dimensionado del programa, de no realizarse estos cambios de tuberías a favor de un planteamiento telescópico necesitaríamos añadir elementos de acople que aumentarían los costes.

El dimensionado óptimo realizado por el programa WaterNetGen no es un dimensionado final como pueda ser el arrojado por el método recursivo o por GESTAR. Esto no solo añade un tratamiento de datos adicional si no también un encarecimiento de la red, puesto que manualmente se pierde la capacidad resolutive de los programas informáticos.

Otro de los problemas es la introducción de las presiones de consigna, ya que como se dijo con anterioridad el programa no acepta decimales en este apartado puesto que arrastra el planteamiento de su programa matriz dándole un enfoque de pisos o alturas de un edificio. Esto supone un tratamiento de datos previo para proceder al redondeo de todas presiones de consigna dadas en la base de datos correspondiente.

### **Tuberías**

A la hora de introducir la base de datos de tuberías debe hacerse en grupos (por timbrajes) ya que el programa solo busca dentro del grupo que se le ha asignado al tramo en cuestión.

El programa no buscará en toda la base de datos tan solo dentro del grupo que haya sido asignado a ese tramo. Esto no resulta del todo práctico puesto que podemos encontrarnos con tuberías de mayor timbraje de distinto material y por lo tanto menos caras.

Para subsanar esto tras un estudio de las bases de datos, se ha considerado en algunas de ellas meter todas las tuberías de timbrajes mayores dentro de un grupo de menor timbraje, posibilitando así que el programa busque en tuberías

de mayor timbraje que puedan ser más baratas y a su vez no pudiendo nunca buscar tuberías de un timbraje menor al establecido como mínimo. Es decir en el grupo de menor timbraje aparecerán todas las tuberías, en el grupo del siguiente timbraje mayor se asignarán todas tuberías de su timbraje y las mayores. Así hasta que en el grupo último (solo se encuentren las tuberías del mayor timbraje).

### **Asignación de timbrajes**

Otra cuestión de suma importancia es que el programa no incorpora es la asignación automática de timbrajes a cada tramo de la red, (GESTAR y el método recursivo sí) es decir se debe introducir tramo por tramo el timbraje de las base de datos dentro del cual el programa debe buscar a la hora de realizar el dimensionado. Así pues es necesario hacer una copia de la red en WaterNetGen y cerrar todos los nodos, es decir asignar a todos los nodos de la red una demanda cero.

De esta forma conseguiremos que la red se encuentre en la condición más desfavorable de presión (con todos nodos cerrados), valiéndonos de las presiones encontradas ahora en cada nodo utilizaremos este archivo como plantilla para ir tramo por tramo en el archivo de WaterNetGen original asignando timbrajes. En los tramos situados entre dos nodos con diferentes presiones siempre se le asignará el timbraje correspondiente a la presión más desfavorable.

### **Tiempo de resolución**

El cálculo del programa con la simulación de *Annealing* puede llevar hasta dos horas en redes grandes o de complejidad mayor, por lo que es un factor muy limitante a la hora de realizar cualquier cambio en la red. En otros programas como GESTAR el tiempo de cálculo es mínimo, pudiendo resolver redes de forma instantánea.

Al encontrarnos ante un programa de libre acceso podemos aprender de forma sólida cómo trabajan y qué hacen los programas de dimensionado de

redes. Tras esto hemos podido comparar y entender el porqué de las muchas limitaciones hidráulicas que los algoritmos tienen que solucionar.

Una de las grandes ventajas es que el módulo WaterNetGen nos permite importar archivos desde su programa matriz EPANET, lo cual dota al módulo de una gran versatilidad.

Es un programa de fácil manejo a nivel académico que permite al usuario entender de manera fácil y clara el proceso de dimensionado de las redes de riego.

También es necesario incidir en las limitaciones que el programa presenta y que han sido tratadas con anterioridad, puesto que para aplicaciones más complejas el tiempo utilizado en la preparación y el tratamiento de los datos puede ser un factor decisivo para dejarlo por debajo de programas como GESTAR.

## 6. CONCLUSIONES

La principal conclusión que se extrae de este trabajo es que el módulo WaterNetGen del programa de cálculo hidráulico EPANET es una herramienta válida para el dimensionado de redes colectivas de riego a presión, ya que ofrece unos valores hidráulicamente correctos y aceptables, así como un ajuste de costes interesante.

No se deben pasar por alto los numerosos inconvenientes que WaterNetGen presenta a la hora de introducir y adaptar los datos convirtiéndolo en muchas ocasiones en una herramienta incómoda.

La matriz de este módulo, EPANET, es un programa concebido para trabajar con redes de abastecimiento urbano y no en redes de riego, es por ello que su módulo WaterNetGen pasa por alto aspectos fundamentales en el dimensionado de redes de riego tales como:

- Dimensionado de la red acorde a los criterios de telescopicidad.
- Posibilidad para introducir decimales en las presiones de consigna.
- Asignación automática de timbrajes.
- Posibilidad de búsqueda en todos los timbrajes de la base de datos, puesto que WaterNetGen solo busca dentro de los timbrajes previamente asignados a cada tramo.
- Tiempos breves de resolución.

El hecho de que el programa no arroje resultados telescópicos introduce cierta incertidumbre puesto que ese ajuste posterior debe ser realizado a mano, perdiendo de este modo efectividad y gran capacidad de resolución. Esto puede suponer que se introduzcan sobrecostes como en el caso de la red 7, en la que tras el ajuste manual de telescopicidad la red ha pasado a situarse por detrás del método recursivo y del método de la serie económica.

La adaptación de los datos para cada red supone un tratamiento previo, en nuestro caso nos hemos valido de hojas Excel para poder transformar aquellos

datos que WaterNetGen no acepta, esto sumado a que el módulo no permite la entrada de datos externos de texto, hace que la introducción de los datos para cada red resulte larga y tediosa.

Uno de los aspectos positivos de este módulo WaterNetGen es que está totalmente integrado en el programa EPANET por lo que se pueden exportar datos desde este último y luego ser leídos desde WaterNetGen.

Cabe añadir que el programa es de libre distribución y que existe numerosa documentación acerca de su programa matriz EPANET. Por el contrario del módulo WaterNetGen no existe demasiada documentación, artículos y manuales aclaratorios de su funcionamiento.

Como se puede comprobar en las Tablas pertenecientes al Anexo 2, el módulo WaterNetGen ajusta de forma satisfactoria las presiones de cada nodo a las requeridas en todos puntos de la red. Es por ello que ofrece resultados satisfactorios y parece situarse al nivel del método recursivo y del método de la serie económica.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ALIOD, R. et GONZÁLEZ, C. (2007). "A computer model for pipe flow irrigation problems". Numerical modelling of hydrodynamics for water resources – García-Navarro & Playán (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44056-1.
- CURTIS, G. (1991). "Análisis numérico". Editorial Alfaomega.
- EPP, R et FOWLER, A. G. (1970). "Efficient code for steady-state flows in Networks". Journal of the Hydraulics Division 96 (HY1), 43–56.
- EQUIPO I+D+I GESTAR (2012). "¿Es EPANET2 una aplicación suficiente para el análisis hidráulico-energético de sistemas de riego? Comparativa con GESTAR 2010". Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- GOLOMB, S. W. y BAUMERT, L. D. (1965) "Backtrack programming". Journal of the ACM, vol 12, nº 4, pp 516-524.
- GONZÁLEZ-CEBOLLADA, C. (2006). "Diseño hidráulico avanzado de sistemas de riego presurizado mediante técnicas de simulación y optimización". Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
- GONZÁLEZ-CEBOLLADA, C., MACARULLA B. y SALLÁN D (2011). "Recursive design of pressurized branched irrigation networks". Journal of Irrigation and Drainage Engineering 137(6)-375:382.
- GRANADOS, A (1990). "Infraestructuras de Regadíos – Redes Colectivas de Riego a Presión". Servicio de Publicación de E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- KARMELI, D., GADISH, Y., et MEYERS, S. (1968). "Design of optimal water distribution networks". Journal of the pipeline division (ASCE), vol. 94, PL1, pp. 1-10.
- KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., et VECCHI, M. P. "Optimization by simulated annealing". Science, ISSN 0036-8075, 220 (4598), 671-680 (1983).
- LABYE, Y. (1966). "Etude des procédés de calcul ayant pour but de rendre minimal le cout d'un reseau de distribution d'eau sous pression". La Houille Blanche, nº5, mayo, pp. 577-583.
- LARSON, F. (1999). "Cálculo". Vol. II. Editorial Mc Graw Hill.



- LISCHER, V. C. (1979). "Discussion of Optimal Design of Water Distribution Networks". Journal of the Hydraulics Division (ASCE). Vol 105, HY1, pp 113.
- MACARULLA, B (2009). "Estudio comparativo de métodos de dimensionado de redes colectivas de riego a presión aplicados al proyecto de red del término municipal de Fonz (Huesca)".
- MARTÍNEZ, F. PÉREZ, R. et IZQUIERDO, J. (1994). "Diseño óptimo y fiabilidad en sistemas de distribución de agua". Mejora del rendimiento y de la fiabilidad en sistemas de distribución de agua. Curso dictado en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo.
- MUNIZAGA, E. (1976). "Redes de agua potable. Diseño y dimensionamiento". Monografía nº 335. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.
- MURANHO, J. (2012). "WaterNetGen: an EPANET extensión for automatic water distribution network models generation and pipe sizing." Water Science and Technology: Water Supply (12.1). IWA Publishing.
- PÉREZ GARCÍA, R. (1993) "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando elementos de distribución". De Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- PRIM, R. C. (1957) "Shortest connection networks and some generalizations". The Bell System Technical Journal 36 (6), 1389–1401.
- SÁ MARQUES, J. A. et SOUSA, J. J. (2009)"Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais (Urban Hydraulics: Water Supply and Wastewater Drainage Systems)". 2nd edition. Coimbra University Press, Coimbra, Portugal.
- SIMPSON, A. R. et GOLDBERG, D. E. (1994). "Pipeline optimisation via genetic algorithms: from theory to practice". 2nd International Conference on Water Pipeline Systems. Mechanical Engineering Publications Limited. Scotland.
- TORRES et VÉLEZ (2006). "Algoritmo de recocido simulado para la descomposición robusta del horizonte de tiempo en problemas de planeación de producción". Ingeniería y Ciencia, ISSN 1794-9165. Colombia
- UPV (1993). Curso de diseño hidráulico de redes de riego. Universidad Politécnica de Valencia

VÁZQUEZ, M (1994). "Recocido simulado: un nuevo algoritmo para la optimización de estructuras". Tesis doctoral. Departamento de Estructuras de Edificación. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Madrid.

## 8. ANEXOS

# ÍNDICE ANEXOS

<b>ANEXO 1.....</b>	<b>3</b>
<b>Tabla 1. Variables hidráulicas de la red de Fonz .....</b>	<b>4</b>
<b>Tabla 2. Presiones en la red de Fonz.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla 3. Tuberías comerciales en la red de Fonz tras ajuste de telescopicidad. .</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 4. Velocidad y restricciones de velocidad en la red de Fonz.....</b>	<b>13</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 5. Presiones en los nodos de la red 1. ....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 6. Presiones en los nodos de la red 4. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 7. Presiones en los nodos de la red cinco. ....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 8. Presiones en los nodos de la red seis. ....</b>	<b>25</b>
<b>Tabla 9. Presiones en los nodos de la red siete. ....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 10. Presiones en los nodos de la red once. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 11. Presiones en los nodos de la red trece.....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 12. Presiones en los nodos de la red catorce.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 13. Presiones en los nodos de la red quince.....</b>	<b>37</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 14. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red uno.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 15. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red cuatro. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 16. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red cinco.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 17. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red seis. ....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 18. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red siete. ....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 19. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red once.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 20. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red trece.....</b>	<b>56</b>

<b>Tabla 21. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red catorce.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 22. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red quince.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabla 23. Ejemplo de balance de caudal para calcular la demanda. ....</b>	<b>65</b>

## **ANEXO 1**

Tabla 1. Variables hidráulicas de la red de Fonz

NODO INICIAL	NODO FINAL	LONGITUD (m)	CAUDAL DE DISEÑO (m <sup>3</sup> /s)	COTA NODO FINAL (m)	PRESIÓN DE CONSIGNA (m)
0	18	312	1.59114	451.901	30
291	1	207	0.24864	398.362	30
86	2	140	0.63071	417.511	30
81	3	380	0.94449	389.42	30
80	7	470	1.05514	397.9	30
75	8	260	1.163	421.742	30
2513	12	70	0.1373	378.9	30
16	15	350	1.48534	455.639	28
71	16	680	1.58483	454.726	29
298	40	232.694	0.10717	375.165	30
2910	50	434	0.03714	363.233	30
18	71	287.759	1.59114	444.086	36
15	72	370	1.21146	441.238	39
72	73	250	1.19736	435.658	44
73	74	350	1.18402	427.613	39
74	75	1	1.17421	427.613	48
8	76	140	1.11608	419.948	30
76	77	300	1.10697	417.019	35
77	78	680	1.09786	404.261	32
78	79	1	1.08596	404.261	41
79	80	1	1.06565	404.261	49
7	81	350	0.95289	393.906	49
3	82	120	0.67834	397.606	52
82	83	230	0.67064	408.15	54
83	84	770	0.66224	411.256	33
84	85	1	0.65173	411.256	51
85	86	1	0.64122	415.726	29
8	221	300	0.04692	427.561	34
221	222	1	0.03361	427.561	42
222	223	451.708	0.02171	440.548	39
223	224	1	0.00981	440.548	39
16	231	200	0.09949	437.847	32
231	232	350	0.09038	423.776	49
232	233	50	0.08407	422.731	52
233	234	350	0.07286	414.754	50
234	235	350	0.06305	401.96	48
235	236	200	0.05605	399.748	40
236	237	400	0.04974	395.972	44
237	238	180	0.03993	392.076	38
238	239	520	0.03153	375.031	50
15	251	200	0.27388	441.151	39

NODO INICIAL	NODO FINAL	LONGITUD (m)	CAUDAL DE DISEÑO (m <sup>3</sup> /s)	COTA NODO FINAL (m)	PRESIÓN DE CONSIGNA (m)
251	252	600	0.26407	430.288	35
252	253	1	0.25637	430.288	50
253	254	200	0.24656	428.914	33
254	255	400	0.23816	417.371	39
255	256	1	0.22765	417.371	36
256	257	300	0.21575	412.17	38
257	258	130	0.20524	406.909	53
258	259	40	0.19263	405.205	40
7	271	100	0.10225	394.983	37
271	272	200	0.09455	389.243	48
272	273	400	0.07984	382.318	40
273	274	1	0.06863	382.318	38
274	275	300	0.05673	377.124	36
275	276	100	0.04692	375.393	34
276	277	300	0.03852	372.857	36
277	278	358.8	0.02521	369.885	33
278	279	28.111	0.0119	369.885	37
3	291	300	0.26615	391.119	51
1	292	193	0.18141	397.02	38
292	293	1	0.1716	397.02	33
293	294	400	0.16039	386.81	55
294	295	1	0.14778	386.81	33
295	296	250	0.13938	384.572	72
296	297	50	0.12607	384.125	28
297	298	300	0.11907	381.44	46
40	299	67.306	0.06096	373.29	67
1	301	100	0.06723	393.681	36
301	302	400	0.05742	377.096	47
302	303	1	0.04552	377.096	44
303	304	300	0.03291	371.222	42
304	305	200	0.02101	369.097	41
305	306	119.459	0.0084	368.094	34
239	2310	300	0.02592	369.006	41
2310	2311	200	0.02102	363.671	56
2311	2312	205.576	0.01471	362.643	37
2312	2313	219.456	0.0084	360.345	50
259	2510	170	0.18002	395.96	64
2510	2511	310	0.16881	389.556	45
2511	2512	1	0.1562	389.556	30
2512	2513	250	0.1492	378.122	30
12	2514	230	0.09247	376.987	39
2514	2515	1	0.07356	376.987	53
2515	2516	400	0.05885	373.628	46



NODO INICIAL	NODO FINAL	LONGITUD (m)	CAUDAL DE DISEÑO (m <sup>3</sup> /s)	COTA NODO FINAL (m)	PRESIÓN DE CONSIGNA (m)
2516	2517	250	0.04274	371.529	48
2517	2518	1	0.03013	371.529	33
2518	2519	389.606	0.01962	368.263	37
2519	2520	1	0.00911	368.263	32
12	2521	500	0.04483	389.632	33
2521	2522	100	0.02802	391.778	40
2522	2523	56.432	0.01541	392.98	31
299	2910	1	0.04625	373.29	30
50	2911	66	0.02243	364.839	45
2911	2912	100	0.01612	366.155	44
2912	2913	350.147	0.00981	370.763	61

Tabla 2. Presiones en la red de Fonz

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	72.33	30
2	51.3	30
3	81.42	30
7	75.32	30
8	58.11	30
12	86.69	30
15	28.14	28
16	29.38	29
18	33.25	30
40	82.33	30
50	87.13	30
71	40.75	36
72	41.96	39
73	47.15	44
74	53.48	39
75	53.48	48
76	59.3	30
77	60.93	35
78	70.81	32
79	70.8	41
80	70.8	49
81	78.16	49
82	73.03	52
83	62.1	54
84	57.76	33
85	57.76	51
86	53.29	29
221	52.16	34
222	52.15	42
223	39	39
224	39	39
231	45.2	32
232	53.52	49
233	53.85	52
234	58.01	50
235	61.89	48
236	60.04	40
237	57.35	44
238	58.83	38
239	71.42	50
251	42.57	39
252	53.26	35

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
253	53.25	50
254	52.52	33
255	60.12	39
256	60.12	36
257	62.87	38
258	67.17	53
259	68.61	40
271	77.41	37
272	78.62	48
273	79	40
274	79	38
275	76.3	36
276	76.2	34
277	74.97	36
278	75.93	33
279	75.89	37
291	79.63	51
292	72.55	38
293	72.54	33
294	80.42	55
295	80.4	33
296	78.92	72
297	78.76	28
298	78.14	46
299	82.17	67
301	75.84	36
302	81.65	47
303	81.63	44
304	84.72	42
305	86.04	41
306	86.96	34
2310	75.67	41
2311	80.21	56
2312	80.81	37
2313	82.95	50
2510	76.88	64
2511	81.29	45
2512	81.28	30
2513	88.48	30
2514	83.61	39
2515	83.61	53
2516	75.67	46
2517	73.94	48
2518	73.94	33

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna (m)</b>
<b>2519</b>	75.84	37
<b>2520</b>	75.84	32
<b>2521</b>	67.58	33
<b>2522</b>	64.75	40
<b>2523</b>	63.42	31
<b>2910</b>	82.15	30
<b>2911</b>	85.23	45
<b>2912</b>	83.67	44
<b>2913</b>	78.72	61

Tabla 3. Tuberías comerciales en la red de Fonz tras ajuste de telescopicidad.

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
1	184.6	0.057
2	782.4	0.057
3	782.4	0.057
4	176.2	0.057
5	277.6	0.057
6	369.4	0.057
7	176.2	0.057
8	277.6	0.057
9	782.4	0.057
11	190.2	0.057
12	782.4	0.057
13	220.4	0.057
14	277.6	0.057
15	277.6	0.057
16	352.6	0.057
17	369.4	0.057
18	369.4	0.057
19	176.2	0.057
20	176.2	0.057
23	277.6	0.057
24	277.6	0.057
25	277.6	0.057
30	782.4	0.057
31	779.6	0.057
32	176.2	0.057
33	176.2	0.057
35	176.2	0.057
41	779.6	0.057
42	779.6	0.057
43	176.2	0.057
44	176.2	0.057
45	176.2	0.057
46	176.2	0.057
48	220.4	0.057
49	220.4	0.057
50	277.6	0.057
52	782.4	0.057
53	782.4	0.057
54	782.4	0.057
55	290.8	0.057
58	782.4	0.057
59	988.6	0.057

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
61	176.2	0.057
62	176.2	0.057
66	176.2	0.057
69	277.6	0.057
72	369.4	0.057
73	369.4	0.057
74	369.4	0.057
75	369.4	0.057
80	789.4	0.057
82	176.2	0.057
83	176.2	0.057
84	176.2	0.057
85	176.2	0.057
86	176.2	0.057
87	176.2	0.057
88	184.6	0.057
89	184.6	0.057
90	184.6	0.057
91	230.8	0.057
92	230.8	0.057
93	230.8	0.057
94	299.6	0.057
97	779.6	0.057
57	988.6	0.057
60	1184.6	0.057
63	277.6	0.057
68	176.2	0.057
98	176.2	0.057
99	176.2	0.057
22	1184.6	0.057
81	1184.6	0.057
95	1184.6	0.057
96	277.6	0.057
71	352.6	0.057
77	369.4	0.057
79	782.4	0.057
39	779.6	0.057
10	782.4	0.057
51	782.4	0.057
29	782.4	0.057
28	782.4	0.057
56	369.4	0.057
76	369.4	0.057
67	220.4	0.057

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
<b>65</b>	176.2	0.057
<b>64</b>	176.2	0.057
<b>38</b>	782.4	0.057
<b>47</b>	176.2	0.057
<b>34</b>	176.2	0.057
<b>36</b>	220.4	0.057
<b>27</b>	369.4	0.057
<b>26</b>	352.6	0.057
<b>100</b>	176.2	0.057

Tabla 4. Velocidad y restricciones de velocidad en la red de Fonz.

<b>Tuberías</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad mínima (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad máxima (m/s)</b>
<b>TU1</b>	1.26	0.32	2.5
<b>TU2</b>	1.33	0.32	2.5
<b>TU3</b>	1.36	0.32	2.5
<b>TU4</b>	1.9	0.32	2.5
<b>TU5</b>	2.44	0.32	2.5
<b>TU6</b>	1.6	0.32	2.5
<b>TU7</b>	1.87	0.32	2.5
<b>TU8</b>	1.13	0.32	2.5
<b>TU9</b>	2.26	0.32	2.5
<b>TU11</b>	0.35	0.32	2.5
<b>TU12</b>	2.44	0.32	2.5
<b>TU13</b>	0.24	0.32	2.5
<b>TU14</b>	0.5	0.32	2.5
<b>TU15</b>	1.22	0.32	2.5
<b>TU16</b>	1.6	0.32	2.5
<b>TU17</b>	2.12	0.32	2.5
<b>TU18</b>	2.39	0.32	2.5
<b>TU19</b>	0.4	0.32	2.5
<b>TU20</b>	0.66	0.32	2.5
<b>TU23</b>	1.97	0.32	2.5
<b>TU24</b>	2.08	0.32	2.5
<b>TU25</b>	2.3	0.32	2.5
<b>TU30</b>	1.39	0.32	2.5
<b>TU31</b>	1.42	0.32	2.5
<b>TU32</b>	0.34	0.32	2.5
<b>TU33</b>	0.86	0.32	2.5
<b>TU35</b>	2.35	0.32	2.5
<b>TU41</b>	1.98	0.32	2.5
<b>TU42</b>	2	0.32	2.5
<b>TU43</b>	0.49	0.32	2.5
<b>TU44</b>	1.03	0.32	2.5
<b>TU45</b>	1.58	0.32	2.5
<b>TU46</b>	1.92	0.32	2.5
<b>TU48</b>	2.09	0.32	2.5
<b>TU49</b>	2.48	0.32	2.5
<b>TU50</b>	1.69	0.32	2.5
<b>TU52</b>	2.28	0.32	2.5
<b>TU53</b>	2.3	0.32	2.5
<b>TU54</b>	2.32	0.32	2.5
<b>TU55</b>	0.33	0.32	2.5
<b>TU58</b>	2.46	0.32	2.5
<b>TU59</b>	1.56	0.32	2.5



<b>Tuberías</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad mínima (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad máxima (m/s)</b>
<b>TU61</b>	0.63	0.32	2.5
<b>TU62</b>	1.15	0.32	2.5
<b>TU66</b>	2.41	0.32	2.5
<b>TU69</b>	2.47	0.32	2.5
<b>TU72</b>	1.68	0.32	2.5
<b>TU73</b>	1.8	0.32	2.5
<b>TU74</b>	1.92	0.32	2.5
<b>TU75</b>	2.01	0.32	2.5
<b>TU80</b>	0.56	0.32	2.5
<b>TU82</b>	0.34	0.32	2.5
<b>TU83</b>	0.6	0.32	2.5
<b>TU84</b>	0.86	0.32	2.5
<b>TU85</b>	1.06	0.32	2.5
<b>TU86</b>	1.29	0.32	2.5
<b>TU87</b>	1.64	0.32	2.5
<b>TU88</b>	1.86	0.32	2.5
<b>TU89</b>	2.09	0.32	2.5
<b>TU90</b>	2.36	0.32	2.5
<b>TU91</b>	1.74	0.32	2.5
<b>TU92</b>	2.01	0.32	2.5
<b>TU93</b>	2.16	0.32	2.5
<b>TU94</b>	1.41	0.32	2.5
<b>TU97</b>	0.52	0.32	2.5
<b>TU57</b>	1.58	0.32	2.5
<b>TU60</b>	1.35	0.32	2.5
<b>TU63</b>	2.27	0.32	2.5
<b>TU68</b>	1.84	0.32	2.5
<b>TU98</b>	1.52	0.32	2.5
<b>TU99</b>	0.92	0.32	2.5
<b>TU22</b>	1.44	0.32	2.5
<b>TU81</b>	1.44	0.32	2.5
<b>TU95</b>	1.44	0.32	2.5
<b>TU96</b>	1.77	0.32	2.5
<b>TU71</b>	1.73	0.32	2.5
<b>TU77</b>	2.3	0.32	2.5
<b>TU79</b>	0.55	0.32	2.5
<b>TU39</b>	0.56	0.32	2.5
<b>TU10</b>	2.22	0.32	2.5
<b>TU51</b>	2.19	0.32	2.5
<b>TU29</b>	1.38	0.32	2.5
<b>TU28</b>	1.31	0.32	2.5
<b>TU56</b>	0.44	0.32	2.5
<b>TU76</b>	2.22	0.32	2.5
<b>TU67</b>	2.42	0.32	2.5

<b>Tuberías</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad mínima (m/s)</b>	<b>Restricción de velocidad máxima (m/s)</b>
<b>TU65</b>	1.75	0.32	2.5
<b>TU64</b>	0.8	0.32	2.5
<b>TU38</b>	2.42	0.32	2.5
<b>TU47</b>	2.33	0.32	2.5
<b>TU34</b>	1.35	0.32	2.5
<b>TU36</b>	1.76	0.32	2.5
<b>TU27</b>	1.69	0.32	2.5
<b>TU26</b>	1.64	0.32	2.5
<b>TU100</b>	2.5	0.32	2.5

## **ANEXO 2**

Tabla 5. Presiones en los nodos de la red 1.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
15	76.24	40.0
16	71.63	40.0
17	62.81	40.6
18	71.22	40.0
19	71.31	45.7
20	71.88	40.0
21	68.62	43.6
22	57.87	41.5
23	57.25	40.0
24	53.38	41.7
25	50.26	41.4
26	46.37	41.5
27	61.6	42.1
28	60.96	40.0
29	57.78	42.9
30	44.05	42.9
31	54.45	43.0
32	46.84	40.9
33	40.94	40.0
34	48.87	40.0
35	49.53	41.4
36	46.09	40.3
37	47.19	40.0
38	47.9	40.0
39	49.21	40.4
40	47.74	40.7
41	45.18	44.6
42	42.55	41.5
43	44.87	42.6
44	43.74	42.7
45	43.49	40.0
46	43.33	40.0
47	45.53	40.4
48	44.75	40.0
49	44.63	44.4
50	66.15	45.0
51	77.66	40.0
52	81.44	40.0
53	65.97	42.1
54	65.59	40.0
55	64.59	40.0
56	65.37	42.5

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
57	61.86	45.4
58	56.03	42.5
59	58.16	40.0
60	53.54	40.0
61	54.12	40.0
62	56.88	40.0
63	55.89	40.8
64	49.82	40.0
65	46.71	44.1
66	45.94	45.5
67	54	43.5
68	49.59	40.0
69	49.4	42.1
70	46.55	41.5
71	42.02	40.0
72	42.32	40.0
73	40.05	40.0
74	60.67	40.1
75	57.13	41.5
76	47.15	40.7
77	42.97	40.9
78	47.72	40.0
79	49.69	40.0
80	49.07	46.1
81	47.5	46.9
82	48.72	43.5
83	40.61	40.6
84	47.52	40.0
85	54.56	45.5
86	53.44	40.1
87	46.89	46.4
89	40.46	40.0
95	45.22	40.0
130	69.36	40.0
131	46.56	40.1
132	46.14	41.9
133	59.74	40.7
134	53.34	51.8
135	50.25	47.2
136	55.44	42.7
137	49.35	41.9
138	47.66	40.0
139	47.36	44.1
140	45.59	42.9

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna (m)</b>
<b>141</b>	40.9	40.9
<b>142</b>	79.71	40.0
<b>146</b>	44.82	40.0
<b>201</b>	81.83	0.0
<b>202</b>	79.09	0.0
<b>204</b>	72.65	0.0
<b>205</b>	66.21	0.0
<b>206</b>	52.78	0.0
<b>207</b>	52.24	0.0
<b>208</b>	47.93	0.0
<b>209</b>	49.74	0.0
<b>210</b>	48.07	0.0
<b>211</b>	44.07	0.0
<b>212</b>	44.55	0.0
<b>213</b>	66.89	0.0
<b>226</b>	67.25	0.0
<b>227</b>	64.45	0.0
<b>228</b>	63.94	0.0
<b>229</b>	61.93	0.0
<b>230</b>	47.7	0.0
<b>231</b>	50.02	0.0
<b>232</b>	53.41	0.0
<b>233</b>	54.87	0.0
<b>234</b>	46.7	0.0
<b>235</b>	42.58	0.0
<b>237</b>	61.4	0.0
<b>238</b>	69.48	0.0
<b>239</b>	59.04	0.0
<b>240</b>	47.95	0.0

Tabla 6. Presiones en los nodos de la red 4.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	101.97	43.7
67	98.18	42.2
72	75.22	49.4
73	75.12	52.3
74	47.68	40.2
75	59.47	40
76	55.41	40.7
77	53.04	40.3
78	51.06	41.5
79	64.24	40
80	67.96	44.6
81	65.96	44.5
82	59.38	41.9
83	58.42	41.7
84	53.81	40.2
85	50.61	40
86	47.81	40.1
87	43.39	40
88	44.71	40.5
89	53.71	40
90	52.71	41.2
91	49.02	40.1
92	46.18	40
93	45.92	40
94	43.88	40.7
95	41.5	40
96	47.8	40
97	41.05	40
98	45.47	40
99	43.09	42.4
100	44.17	40
101	40.17	40
102	42.37	30
103	49.73	40
104	45.71	40
105	42.75	30
106	43.8	43.1
107	44.21	40.5
108	52.19	40.5
109	43.41	41
110	45.18	40.7
111	42.87	40

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
112	44.08	43.9
113	45.98	43.2
114	46.96	40
115	58.71	40
116	56.13	40
117	54	40
118	53.7	40
119	47.76	41.6
120	47.76	40.7
121	60.99	41.1
122	58.52	42.7
123	58.29	40.3
124	55.1	41.1
125	49.93	40.9
126	69.87	40
127	68.52	42.4
128	65.22	40.6
133	77.74	41.4
166	97.52	40
170	54.94	40.6
171	54.16	40
172	53.72	40
173	66.41	41.6
177	101.56	40
221	73.52	0
222	98.58	0
223	100.65	0
227	78.5	0
228	64.68	0
229	57.68	0
230	43.86	0
231	44.44	0
232	45.11	0
233	54.18	0
234	49.74	0
235	61.04	0
236	54.09	0
237	68.67	0



Tabla 7. Presiones en los nodos de la red cinco.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	69	0
2	59.16	40
22	75.6	41.7
30	82.41	43
31	86.28	40
32	82.27	41.8
33	91.14	40
34	90.17	47.3
42	64.98	42.2
43	63.26	40
44	63.01	40
45	63.35	42.1
46	77.71	40
47	77.91	40
48	80.83	41
49	77.82	40.5
50	75.9	42.5
51	72.97	44.8
52	67.8	40
53	72.1	41.5
54	72.19	41.9
55	67	40
56	65.6	40.9
57	65.5	41
58	61.71	42.7
59	56.89	40.2
60	68.13	41.1
61	68.29	41.9
62	54.04	44
63	68.59	41.3
64	65.8	42
65	59.77	41.2
66	58.3	49.7
68	61.04	40
69	48.49	40
70	40.9	40
71	40.94	40
126	41.57	0
128	42.2	0
129	79.05	42.1
130	82.92	41.1

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna (m)</b>
<b>131</b>	80.79	44.8
<b>132</b>	74.33	40.8
<b>134</b>	92	43.5
<b>135</b>	79.54	40
<b>136</b>	79.84	40
<b>137</b>	69.03	42.3
<b>138</b>	39.02	10
<b>139</b>	69.36	65.2
<b>140</b>	58.36	42.1
<b>141</b>	13.33	10
<b>142</b>	23.16	10
<b>143</b>	71.56	69.9
<b>144</b>	67.48	67.1
<b>145</b>	86.92	42.4
<b>146</b>	66.72	54.1
<b>147</b>	11.01	10
<b>148</b>	27.24	10
<b>149</b>	11.37	10
<b>150</b>	14.74	10
<b>151</b>	38.01	10
<b>152</b>	68.04	67.2
<b>153</b>	57.18	55.9
<b>154</b>	45.59	40
<b>155</b>	97.95	54.9
<b>156</b>	90.29	40.4
<b>157</b>	65.05	40
<b>158</b>	55.3	40
<b>159</b>	40.29	10
<b>160</b>	52.13	44.7
<b>161</b>	64.02	40
<b>162</b>	58.01	57.8
<b>163</b>	79.27	42.3
<b>164</b>	85.15	45.8
<b>165</b>	89.25	40.1
<b>167</b>	67.01	43.5
<b>168</b>	43.53	41.2
<b>169</b>	76	41.6
<b>174</b>	83.77	44.7
<b>175</b>	98.06	46.2
<b>176</b>	64.61	42.7
<b>177</b>	68.1	0
<b>178</b>	88.8	41.2
<b>221</b>	41.63	0
<b>222</b>	65.95	0

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
223	65.7	0
224	66.19	0
225	62.82	0
226	65.67	0
237	41.63	0
238	87.98	0
239	63.3	0
240	78.68	0
241	80.87	0
242	80.08	0
243	91.51	0
244	96.49	0
245	99.08	0
246	94.26	0
247	68.98	0
248	67.19	0
249	47.72	0
250	35.77	0
251	47.68	0
252	53.51	0
253	54.58	0
254	63.28	0
255	69.03	0
256	70.41	0
257	100.64	0
258	106.07	0
259	86.65	0
260	84.45	0
261	83.74	0
262	89.65	0
263	54.38	0
264	54.58	0
265	62.36	0
266	27.6	0

Tabla 8. Presiones en los nodos de la red seis.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	69.25	0
2	59.98	40
22	76.82	41.7
30	83.53	43
31	87.96	40
32	83.16	41.8
33	92.94	40
34	92.54	47.3
42	65.9	42.2
43	62.81	40
44	63.24	40
45	63.7	42.1
46	81.4	40
47	81.94	40
48	85.26	41
49	84.09	40.5
50	77.55	42.5
51	74.67	44.8
52	69.69	40
53	74.33	41.5
54	74.48	41.9
55	71.11	40
56	71	40.9
57	70.84	41
58	69.95	42.7
59	66	40.2
60	74.38	41.1
61	73.89	41.9
62	60.58	44
63	74.5	41.3
64	72.36	42
65	67.7	41.2
66	66.69	49.7
68	60.65	40
69	51.11	40
70	43.98	40
71	43.88	40
126	41.8	0
128	42.71	0
129	80.01	42.1
130	83.89	41.1
131	81.77	44.8

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
132	74.72	40.8
134	93.37	43.5
135	81.16	40
136	81.49	40
137	69.79	42.3
138	38.66	10
139	69.88	65.2
140	61.26	42.1
141	10.83	10
142	22.41	10
143	70.79	69.9
144	67.68	67.1
145	88.1	42.4
146	68.32	54.1
147	12.32	10
148	30.38	10
149	15.44	10
150	17.51	10
151	36.91	10
152	68.88	67.2
153	58.03	55.9
154	43.44	40
155	99.45	54.9
156	92.28	40.4
157	65.54	40
158	55.56	40
159	40.81	10
160	51.87	44.7
161	64.42	40
162	58.1	57.8
163	83.54	42.3
164	86.04	45.8
165	90.9	40.1
167	67.94	43.5
168	47.67	41.2
169	77.62	41.6
174	86.18	44.7
175	104.16	46.2
176	68.8	42.7
177	68.56	0
178	89.47	41.2
221	41.63	0
222	66.05	0
223	66.77	0

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna (m)</b>
224	67.67	0
225	64.21	0
226	71.06	0
237	41.95	0
238	88.83	0
239	62.81	0
240	82.67	0
241	81.87	0
242	81.12	0
243	92.79	0
244	97.95	0
245	100.36	0
246	95.41	0
247	69.77	0
248	68.76	0
249	48.71	0
250	38.12	0
251	48.07	0
252	53.72	0
253	55.55	0
254	63.82	0
255	69.48	0
256	70.95	0
257	102.23	0
258	106.97	0
259	87.24	0
260	85.23	0
261	84.95	0
262	91.17	0
263	54.66	0
264	54.84	0
265	62.84	0
266	30.73	0

Tabla 9. Presiones en los nodos de la red siete.

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna (m)</b>
4	37.64	30.5
5	40.11	40
6	41	40.2
7	42.73	40
8	43.16	40.9
9	40.88	40
10	40.45	40.1
11	40.93	40
12	41.3	40
13	39.43	36
14	41.42	40
15	45.4	41.1
16	43.85	40
17	43.68	41.7
18	41.97	41.1
19	44.58	42.3
20	43.61	43.1
21	43.26	41.2
23	54.42	44.1
24	53.33	40
25	54.06	0
26	51.5	40
27	51.64	40.8
28	50.44	40
29	44.6	41.5
35	43.01	42.9
36	45.84	40.4
37	52.14	41.3
38	53.16	42.7
39	49.02	41.9
40	48.85	40
41	44.42	41.3
201	18.74	0
202	22.44	0
203	27.46	0
204	32.63	0
205	34.98	0
206	44.13	0
207	41.4	0
208	40.26	0
209	53.8	40.3
210	50.38	0

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
211	53.83	0
212	53.6	0
213	50.51	0
214	43.77	0
215	45.27	0
216	44.37	0
217	43.66	0



Tabla 10. Presiones en los nodos de la red once.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
4	44.64	37
5	37.19	37
8	40.91	40
9	47.14	40
11	48.11	40
12	50.88	50.7
13	50.05	41.4
14	60.33	46.9
15	63.28	42.9
16	57.82	46.2
17	65.41	40
18	65.19	50.8
19	49.27	40.1
20	50.97	40.7
21	49.61	49.6
22	65.95	60.3
23	68.69	48.9
24	68.43	48.7
25	72.74	44.3
27	72.27	40
28	66.56	40
29	65.64	42.1
40	46.02	40
41	46.64	40
42	72.39	40
43	71.92	40
44	65.69	45.9
45	64.66	40.4
46	67.33	40
47	76.49	40
48	76.24	40
49	64.68	40
50	42.83	40
51	38.04	37
52	41.6	37
53	37.13	37
55	47.05	40
56	74.65	40
60	38.85	37
63	39.42	37
64	36.99	37

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
301	21.24	0
302	41.1	0
303	46.5	0
304	48.14	0
305	45.95	0
306	63.76	0
307	72.27	0
308	71.47	0
309	71.96	0
310	75.37	0
311	69.37	0
312	42.75	0

Tabla 11. Presiones en los nodos de la red trece.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	45.87	45
2	57.95	45
3	53.22	45
4	55.5	45
5	56.63	45
6	54.87	45
7	45.19	45
8	55.03	45
9	49.03	45
10	45.66	45
11	64.42	45
12	62.15	45
13	64.04	45
14	64.61	45
15	63.08	45
16	62.12	45
17	63.13	45
18	63.89	45
19	63.55	45
20	57.92	45
21	58.21	45
22	56.87	45
23	59.52	45
24	59.56	45
25	59.07	45
26	57.48	45
27	57.21	45
28	56.94	45
29	56.12	45
30	54.6	45
31	53.68	45
32	52.91	45
33	47.54	45
34	45.91	45
35	46.64	45
36	46.07	45
37	51.58	45
38	47.27	45
39	49.19	45
40	47.6	45
41	46.72	45
42	50	45

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
43	49.62	45
44	50.25	45
45	49.81	45
46	48	45
47	48.19	45
48	47.82	45
49	47.67	45
50	48.74	45
51	51.62	45
52	48.76	45
53	49.08	45
54	47.56	45
55	47.4	45
56	46.31	45
57	45.24	45
58	45.26	45
59	46	45
60	46.11	45
100	66.33	0
131	63.28	0
161	62.12	0
191	61.81	0
192	60.37	0
200	66.23	0
301	53.18	0
321	50.07	0
371	51.03	0
391	47.55	0
410	56.73	0
451	49.1	0
461	47.63	0
571	45.86	0
610	55.75	0
999	59	0

Tabla 12. Presiones en los nodos de la red catorce.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	51.17	45
2	46.23	45
3	53.09	45
4	57.09	45
5	64.38	45
6	45.56	45
7	51.67	45
8	55.08	45
9	53.8	45
10	53.32	45
11	54.16	45
12	62.22	45
13	60.11	45
14	57.15	45
15	58.47	45
16	64.37	45
17	48.82	45
18	78.05	45
19	78.99	45
20	70.62	45
21	71.07	45
22	67.29	45
23	66.48	45
24	73.56	45
25	64.43	45
26	67.74	45
27	64.62	45
28	45.13	45
29	49	45
30	45.85	45
31	50.29	45
32	49.58	45
33	45.41	45
34	51.32	45
35	52.37	45
36	52.52	45
37	55.18	45
38	48.74	45
39	65.44	45
40	60.08	45
41	60.59	45
42	58.58	45

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
43	58.81	45
45	53.87	45
46	45.35	45
47	53.95	45
48	46.25	45
49	45.53	45
50	47.41	45
51	63.34	45
52	64.43	45
53	68.68	45
54	66.36	45
55	63.72	45
56	56.89	45
57	54.92	45
58	63.45	45
59	54.28	45
60	60.94	45
61	65.55	45
62	65.79	45
63	46.57	45
64	59.9	45
65	59.99	45
66	46.58	45
67	62.37	45
68	63.32	45
69	50.89	45
70	51.03	45
71	64.43	45
72	45.02	45
73	53.46	45
74	52.9	45
75	65.44	45
76	75.11	45
171	47.5	0
211	72.17	0
261	56.55	0
391	53.08	0
411	61.12	0
471	53.56	0
510	66.37	0
531	60.52	0
600	59.41	0
700	57.33	0
710	53.17	0

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
999	57.99	0

Tabla 13. Presiones en los nodos de la red quince.

Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna (m)
1	71.31	45
2	61.08	45
3	60.37	45
4	70.69	45
5	70.95	45
6	67.12	45
7	65.21	45
8	73.54	45
9	73.19	45
10	69.25	45
11	69.83	45
12	68.92	45
13	68.88	45
14	67.55	45
15	68.89	45
16	62.58	45
17	61.89	45
18	50.84	45
19	47.16	45
20	52.09	45
21	65.23	45
22	55.23	45
23	45.09	45
24	45.99	45
25	46.89	45
26	66.65	45
27	69.75	45
28	71.62	45
29	64.24	45
30	67.33	45
31	52.37	45
32	60.14	45
33	67.83	45
34	69.76	45
35	57.91	45
36	54.87	45
37	56.98	45
38	63.22	45
39	57.79	45
40	54.09	45
41	57.21	45
42	60.43	45



Nodo ID	Presión (m)	Presión de consigna(m)
43	58.88	45
44	62.61	45
45	48.86	45
46	52.29	45
47	53.85	45
48	55.94	45
49	55.69	45
50	50.53	45
51	45.25	45
52	45.87	45
53	57	45
54	52.69	45
55	59.18	45
56	50.65	45
57	47.03	45
58	48.02	45
59	55.34	45
60	55.76	45
61	53.32	45
62	51.59	45
63	48.9	45
64	55.72	45
65	47.83	45
66	45.1	45
67	46.85	45
68	45.02	45
69	45.06	45
70	50.82	45
71	50.72	45
72	48.63	45
73	46.34	45
74	49.18	45
75	52.46	45
76	50.18	45
77	47.15	45
78	49.29	45
79	45.03	45
80	45.81	45
81	52.24	45
82	54.85	45
83	54.78	45
84	49.57	45
85	55.78	45
86	50.55	45

<b>Nodo ID</b>	<b>Presión (m)</b>	<b>Presión de consigna(m)</b>
<b>87</b>	47.14	45
<b>88</b>	45.22	45
<b>89</b>	50.21	45
<b>90</b>	47.68	45
<b>91</b>	46.59	45
<b>92</b>	49.02	45
<b>93</b>	46.18	45
<b>94</b>	47.31	45
<b>95</b>	56.05	45
<b>96</b>	62.91	45
<b>97</b>	47.85	45
<b>98</b>	47.72	45
<b>99</b>	61.64	45
<b>161</b>	61.57	0
<b>221</b>	65.22	0
<b>261</b>	65.61	0
<b>281</b>	71.61	0
<b>341</b>	67.79	0
<b>431</b>	57.44	0
<b>441</b>	61.54	0
<b>481</b>	56.11	0
<b>510</b>	68.26	0
<b>531</b>	56.86	0
<b>541</b>	45.41	0
<b>551</b>	54.92	0
<b>552</b>	54.71	0
<b>553</b>	53.75	0
<b>611</b>	53.79	0
<b>681</b>	44.94	0
<b>821</b>	56.24	0
<b>891</b>	48.29	0
<b>901</b>	48	0
<b>999</b>	54.98	0
<b>1000</b>	54.9	0
<b>1001</b>	57.88	0
<b>1002</b>	55.08	0
<b>1003</b>	54.92	0
<b>1004</b>	54.37	0
<b>1005</b>	55.15	0
<b>1006</b>	66.17	0
<b>1007</b>	65.42	0
<b>1008</b>	62.82	0

## **ANEXO 3**

Tabla 14. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red uno.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
55	506.6	0.007
56	555.2	0.007
57	321.2	0.007
58	144.6	0.007
59	126.6	0.007
60	285	0.007
61	321.2	0.007
62	506.6	0.007
63	203.4	0.007
64	226.2	0.007
65	555.2	0.007
66	110.2	0.007
67	158.6	0.007
68	555.2	0.007
69	176.2	0.007
70	110.2	0.007
71	110.2	0.007
72	123.4	0.007
73	555.2	0.007
74	555.2	0.007
90	493.6	0.007
93	110.2	0.007
94	158.6	0.007
95	144.6	0.007
96	180.8	0.007
97	506.6	0.007
98	452.2	0.007
99	493.6	0.007
100	506.6	0.007
101	113	0.007
102	180.8	0.007
103	162.8	0.007
104	180.8	0.007
105	506.6	0.007
106	506.6	0.007
107	570	0.007
108	113	0.007
109	321.2	0.007
110	113	0.007
111	203.4	0.007
112	113	0.007
113	113	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
114	144.6	0.007
115	110.2	0.007
116	452.2	0.007
117	203.4	0.007
118	226.2	0.007
119	144.6	0.007
120	226.2	0.007
121	180.8	0.007
122	253.2	0.007
123	407	0.007
124	203.4	0.007
125	321.2	0.007
126	452.2	0.007
127	452.2	0.007
128	452.2	0.007
129	144.6	0.007
130	452.2	0.007
131	506.6	0.007
132	113	0.007
133	113	0.007
134	126.6	0.007
135	113	0.007
136	162.8	0.007
137	180.8	0.007
138	144.6	0.007
139	253.2	0.007
140	113	0.007
141	144.6	0.007
142	253.2	0.007
143	285	0.007
144	285	0.007
145	253.2	0.007
146	113	0.007
147	144.6	0.007
148	113	0.007
149	113	0.007
150	144.6	0.007
151	162.8	0.007
152	113	0.007
153	162.8	0.007
154	203.4	0.007
155	113	0.007
156	144.6	0.007
157	321.2	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
158	361.8	0.007
159	407	0.007
160	407	0.007
161	452.2	0.007
162	452.2	0.007
163	452.2	0.007
164	452.2	0.007
165	113	0.007
166	162.8	0.007
167	253.2	0.007
168	253.2	0.007
169	253.2	0.007
170	113	0.007
171	253.2	0.007
172	285	0.007
173	180.8	0.007
174	113	0.007
175	361.8	0.007
176	361.8	0.007
177	285	0.007
178	361.8	0.007
179	506.6	0.007
180	113	0.007
181	226.2	0.007
182	285	0.007
183	113	0.007
184	285	0.007
185	625.8	0.007
186	113	0.007

Tabla 15. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red cuatro.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
24	203.4	0.007
25	285	0.007
26	452.2	0.007
43	226.2	0.007
44	203.4	0.007
45	361.8	0.007
46	126.6	0.007
47	407	0.007
48	285	0.007
49	361.8	0.007
50	321.2	0.007
51	144.6	0.007
52	203.4	0.007
53	162.8	0.007
54	113	0.007
55	203.4	0.007
56	162.8	0.007
57	226.2	0.007
58	180.8	0.007
59	452.2	0.007
60	162.8	0.007
61	407	0.007
62	123.4	0.007
63	113	0.007
64	600	0.01
71	600	0.01
84	600	0.01
88	600	0.01
94	600	0.01
95	600	0.01
96	700	0.01
139	176.2	0.007
140	253.2	0.007
141	277.6	0.007
142	226.2	0.007
143	126.6	0.007
144	226.2	0.007
145	226.2	0.007
146	570	0.007
147	126.6	0.007
148	253.2	0.007
149	253.2	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
150	126.6	0.007
151	285	0.007
152	203.4	0.007
153	126.6	0.007
154	253.2	0.007
155	253.2	0.007
156	203.4	0.007
157	162.8	0.007
158	126.6	0.007
160	285	0.007
161	285	0.007
162	506.6	0.007
163	123.4	0.007
164	226.2	0.007
165	158.6	0.007
166	176.2	0.007
167	158.6	0.007
168	123.4	0.007
169	600	0.01
170	176.2	0.007
171	600	0.01
172	198.2	0.007
173	176.2	0.007
174	198.2	0.007
175	176.2	0.007
176	123.4	0.007
177	123.4	0.007
178	123.4	0.007
179	600	0.01
180	123.4	0.007
182	113	0.007
183	642.2	0.007
184	162.8	0.007
185	123.4	0.007
186	312.8	0.007
187	180.8	0.007
188	246.8	0.007
1	625.8	0.007



Tabla 16. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red cinco.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
1	123.4	0.007
2	119.4	0.007
3	537.4	0.007
4	170.6	0.007
5	119.4	0.007
6	537.4	0.007
7	170.6	0.007
8	170.6	0.007
9	119.4	0.007
10	113	0.007
11	452.2	0.007
12	426.4	0.007
13	119.4	0.007
14	119.4	0.007
15	170.6	0.007
16	500	0.03
17	477.6	0.007
18	426.4	0.007
19	477.6	0.007
20	426.4	0.007
21	119.4	0.007
22	119.4	0.007
23	113	0.007
27	198.2	0.007
28	312.8	0.007
29	119.4	0.007
30	246.8	0.007
31	119.4	0.007
32	246.8	0.007
33	126.6	0.007
34	180.8	0.007
35	312.8	0.007
36	312.8	0.007
37	246.8	0.007
38	198.2	0.007
39	176.2	0.007
40	213.2	0.007
41	123.4	0.007
42	170.6	0.007
65	123.4	0.007
66	123.4	0.007
67	123.4	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
68	123.4	0.007
69	126.6	0.007
70	203.4	0.007
71	361.8	0.007
72	126.6	0.007
73	642.2	0.007
74	277.6	0.007
75	268.6	0.007
76	246.8	0.007
77	123.4	0.007
78	176.2	0.007
79	123.4	0.007
80	625.8	0.007
81	537.4	0.007
82	407	0.007
83	321.2	0.007
85	198.2	0.007
86	312.8	0.007
87	246.8	0.007
88	352.6	0.007
89	352.6	0.007
90	246.8	0.007
91	440.6	0.007
92	352.6	0.007
93	285	0.007
94	352.6	0.007
96	352.6	0.007
97	396.6	0.007
98	141	0.007
99	352.6	0.007
100	352.6	0.007
101	625.8	0.007
102	123.4	0.007
103	625.8	0.007
104	123.4	0.007
105	119.4	0.007
106	383.8	0.007
107	277.6	0.007
108	277.6	0.007
109	246.8	0.007
110	352.6	0.007
111	352.6	0.007
112	352.6	0.007
113	396.6	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
114	238.8	0.007
115	170.6	0.007
116	625.8	0.007
117	176.2	0.007
118	213.2	0.007
119	592.4	0.007
120	592.4	0.007
121	321.2	0.007
122	277.6	0.007
123	277.6	0.007
124	625.8	0.007
125	119.4	0.007
126	625.8	0.007
127	277.6	0.007
128	213.2	0.007
129	119.4	0.007
130	123.4	0.007
131	198.2	0.007
132	176.2	0.007
133	213.2	0.007
134	213.2	0.007
135	119.4	0.007
136	246.8	0.007
137	123.4	0.007
138	123.4	0.007
168	642.2	0.007
174	642.2	0.007
175	642.2	0.007
189	162.8	0.007
190	113	0.007
191	113	0.007
192	113	0.007
25	642.2	0.007

Tabla 17. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red seis.

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
1	129.2	0.007
2	123.4	0.007
3	600	0.01
4	176.2	0.007
5	123.4	0.007
6	600	0.01
7	176.2	0.007
8	176.2	0.007
9	123.4	0.007
10	123.4	0.007
11	400	0.01
12	400	0.01
13	123.4	0.007
14	123.4	0.007
15	176.2	0.007
16	600	0.01
17	400	0.01
18	400	0.01
19	400	0.01
20	400	0.01
21	123.4	0.007
22	123.4	0.007
23	123.4	0.007
27	230.8	0.007
28	369.4	0.007
29	123.4	0.007
30	290.8	0.007
31	123.4	0.007
32	230.8	0.007
33	115.4	0.007
34	184.6	0.007
35	369.4	0.007
36	290.8	0.007
37	230.8	0.007
38	230.8	0.007
39	184.6	0.007
40	220.4	0.007
41	115.4	0.007
42	176.2	0.007
65	115.4	0.007
66	115.4	0.007
67	115.4	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
68	115.4	0.007
69	129.2	0.007
70	230.8	0.007
71	369.4	0.007
72	129.2	0.007
73	700	0.01
74	290.8	0.007
75	277.6	0.007
76	230.8	0.007
77	115.4	0.007
78	184.6	0.007
79	115.4	0.007
80	600	0.01
81	600	0.01
82	369.4	0.007
83	290.8	0.007
85	230.8	0.007
86	290.8	0.007
87	230.8	0.007
88	369.4	0.007
89	369.4	0.007
90	230.8	0.007
91	369.4	0.007
92	369.4	0.007
93	230.8	0.007
94	369.4	0.007
96	369.4	0.007
97	369.4	0.007
98	115.4	0.007
99	369.4	0.007
100	369.4	0.007
101	600	0.01
102	115.4	0.007
103	600	0.01
104	115.4	0.007
105	123.4	0.007
106	400	0.01
107	290.8	0.007
108	290.8	0.007
109	184.6	0.007
110	369.4	0.007
111	369.4	0.007
112	369.4	0.007
113	369.4	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
114	277.6	0.007
115	176.2	0.007
116	600	0.01
117	184.6	0.007
118	220.4	0.007
119	600	0.01
120	600	0.01
121	290.8	0.007
122	290.8	0.007
123	290.8	0.007
124	600	0.01
125	123.4	0.007
126	600	0.01
127	290.8	0.007
128	220.4	0.007
129	123.4	0.007
130	115.4	0.007
131	184.6	0.007
132	184.6	0.007
133	220.4	0.007
134	220.4	0.007
135	123.4	0.007
136	230.8	0.007
137	115.4	0.007
138	129.2	0.007
168	700	0.01
174	600	0.01
175	700	0.01
189	184.6	0.007
190	400	0.01
191	115.4	0.007
192	400	0.01
25	700	0.01

Tabla 18. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red siete.

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
1	642.2	0.007
4	162.8	0.007
5	361.8	0.007
6	162.8	0.007
7	113	0.007
8	113	0.007
9	126.6	0.007
10	162.8	0.007
11	253.2	0.007
12	321.2	0.007
13	226.2	0.007
14	203.4	0.007
15	203.4	0.007
16	126.6	0.007
17	361.8	0.007
18	570	0.007
19	570	0.007
20	285	0.007
21	285	0.007
22	285	0.007
23	285	0.007
24	203.4	0.007
25	162.8	0.007
26	285	0.007
28	226.2	0.007
29	253.2	0.007
30	285	0.007
31	506.6	0.007
32	506.6	0.007
33	285	0.007
34	642.2	0.007
35	642.2	0.007
36	253.2	0.007
37	113	0.007
38	203.4	0.007
39	226.2	0.007
40	285	0.007
41	113	0.007
42	162.8	0.007
43	113	0.007
45	203.4	0.007
46	203.4	0.007

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
54	285	0.007
27	113	0.007
2	285	0.007
44	285	0.007
47	285	0.007
48	253.2	0.007
49	162.8	0.007



Tabla 19. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red once.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
1	440.6	0.007
2	396.6	0.007
3	158.6	0.007
4	493.6	0.007
5	106.6	0.007
6	440.6	0.007
7	440.6	0.007
8	493.6	0.007
9	110.2	0.007
10	246.8	0.007
11	110.2	0.007
12	440.6	0.007
13	493.6	0.007
14	110.2	0.007
15	158.6	0.007
16	158.6	0.007
17	158.6	0.007
18	220.4	0.007
19	396.6	0.007
20	570	0.007
21	253.2	0.007
22	162.8	0.007
23	396.6	0.007
24	162.8	0.007
25	226.2	0.007
26	246.8	0.007
27	570	0.007
28	277.6	0.007
29	493.6	0.007
30	493.6	0.007
31	277.6	0.007
32	555.2	0.007
33	110.2	0.007
34	144.6	0.007
35	570	0.007
36	113	0.007
37	113	0.007
38	144.6	0.007
39	144.6	0.007
40	642.2	0.007
41	253.2	0.007
42	113	0.007

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
43	570	0.007
44	226.2	0.007
45	570	0.007
46	113	0.007
47	162.8	0.007
48	203.4	0.007
49	321.2	0.007
50	113	0.007
51	321.2	0.007
52	253.2	0.007
53	570	0.007

Tabla 20. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red trece.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
7	285	0.002
1	226.2	0.002
10	180.8	0.002
192	361.8	0.002
24	892.4	0.01
18	113	0.002
6	113	0.002
9	162.8	0.002
5	510.8	0.01
410	226.2	0.002
2	180.8	0.002
4	285	0.002
610	361.8	0.002
8	285	0.002
3	126.6	0.002
14	99.4	0.002
100	991.2	0.01
200	510.8	0.01
11	113	0.002
12	99.4	0.002
13	361.8	0.002
131	361.8	0.002
19	892.4	0.01
17	126.6	0.002
161	180.8	0.002
16	285	0.002
15	361.8	0.002
191	892.4	0.01
23	162.8	0.002
34	99.4	0.002
20	180.8	0.002
21	285	0.002
25	892.4	0.01
26	892.4	0.01
27	892.4	0.01
28	892.4	0.01
22	285	0.002
35	113	0.002
29	892.4	0.01
30	892.4	0.01
321	180.8	0.002
36	144.6	0.002

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
33	226.2	0.002
40	226.2	0.002
301	892.4	0.01
31	361.8	0.002
32	285	0.002
37	892.4	0.01
371	892.4	0.01
38	361.8	0.002
39	361.8	0.002
391	285	0.002
41	180.8	0.002
42	991.2	0.01
43	692.8	0.01
49	285	0.002
50	226.2	0.002
51	144.6	0.002
52	113	0.002
47	226.2	0.002
48	144.6	0.002
58	113	0.002
44	692.8	0.01
45	692.8	0.01
451	594.2	0.01
46	361.8	0.002
461	361.8	0.002
53	692.8	0.01
54	510.8	0.01
55	510.8	0.01
56	510.8	0.01
57	361.8	0.002
571	226.2	0.002
59	180.8	0.002
60	126.6	0.002
61	1391	0.01

Tabla 21. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red catorce.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
510	369.4	0.007
710	290.8	0.007
7	290.8	0.007
4	290.8	0.007
5	290.8	0.007
13	115.4	0.007
531	1200	0.01
53	1200	0.01
62	1200	0.01
58	1200	0.01
61	461.8	0.007
600	1200	0.01
60	1200	0.01
67	1200	0.01
69	1200	0.01
700	400	0.01
70	290.8	0.007
66	369.4	0.007
65	290.8	0.007
55	184.6	0.007
56	184.6	0.007
54	1200	0.01
71	1200	0.01
52	290.8	0.007
34	1000	0.01
35	1000	0.01
36	1000	0.01
43	900	0.01
42	900	0.01
37	900	0.01
45	1000	0.01
20	230.8	0.007
27	147.6	0.007
25	115.4	0.007
23	115.4	0.007
24	184.6	0.007
211	230.8	0.007
21	230.8	0.007
38	184.6	0.007
74	184.6	0.007
73	290.8	0.007
261	369.4	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
26	400	0.01
29	369.4	0.007
22	461.8	0.007
33	461.8	0.007
171	600	0.01
17	600	0.01
391	600	0.01
39	600	0.01
40	115.4	0.007
16	700	0.01
15	700	0.01
11	700	0.01
14	700	0.01
471	600	0.01
47	700	0.01
48	400	0.01
1	115.4	0.007
12	129.2	0.007
46	290.8	0.007
49	369.4	0.007
59	290.8	0.007
31	115.4	0.007
32	369.4	0.007
51	1000	0.01
18	290.8	0.007
75	115.4	0.007
76	290.8	0.007
28	290.8	0.007
30	147.6	0.007
72	290.8	0.007
63	115.4	0.007
57	115.4	0.007
411	900	0.01
50	369.4	0.007
6	230.8	0.007
19	290.8	0.007
64	147.6	0.007
68	1200	0.01
41	900	0.01
8	461.8	0.007
9	461.8	0.007
10	461.8	0.007
3	147.6	0.007
2	129.2	0.007

Tramo/Tubería ID	Diámetro (mm)	Rugosidad (mm)
44	1400	0.01

Tabla 22. Tuberías comerciales asignadas por WNG en la red quince.

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
26	700	0.01
1	110.2	0.007
23	290.8	0.007
25	184.6	0.007
22	700	0.01
21	700	0.01
33	800	0.01
34	800	0.01
1008	800	0.01
30	147.6	0.007
38	230.8	0.007
41	230.8	0.007
92	184.6	0.007
93	369.4	0.007
56	184.6	0.007
2	123.4	0.007
3	110.2	0.007
4	123.4	0.007
510	176.2	0.007
5	220.4	0.007
8	220.4	0.007
10	461.8	0.007
6	369.4	0.007
7	369.4	0.007
9	230.8	0.007
19	115.4	0.007
18	129.2	0.007
20	147.6	0.007
17	230.8	0.007
14	110.2	0.007
15	141	0.007
161	290.8	0.007
96	290.8	0.007
16	290.8	0.007
11	461.8	0.007
13	369.4	0.007
12	369.4	0.007
221	700	0.01
261	700	0.01
29	129.2	0.007
27	115.4	0.007
281	184.6	0.007



<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
28	184.6	0.007
341	700	0.01
36	115.4	0.007
37	147.6	0.007
40	115.4	0.007
1005	147.6	0.007
39	184.6	0.007
24	115.4	0.007
99	230.8	0.007
32	800	0.01
1007	800	0.01
1006	800	0.01
31	230.8	0.007
95	230.8	0.007
35	147.6	0.007
42	290.8	0.007
431	290.8	0.007
43	369.4	0.007
44	369.4	0.007
441	800	0.01
1004	900	0.01
1003	900	0.01
1002	900	0.01
98	230.8	0.007
46	184.6	0.007
45	290.8	0.007
1001	900	0.01
47	290.8	0.007
49	230.8	0.007
97	184.6	0.007
50	184.6	0.007
481	290.8	0.007
48	290.8	0.007
91	230.8	0.007
94	369.4	0.007
891	369.4	0.007
89	369.4	0.007
88	230.8	0.007
901	461.8	0.007
90	461.8	0.007
84	600	0.01
83	700	0.01
57	184.6	0.007
58	230.8	0.007

<b>Tramo/Tubería ID</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Rugosidad (mm)</b>
81	230.8	0.007
59	290.8	0.007
821	369.4	0.007
82	400	0.01
611	700	0.01
61	700	0.01
551	800	0.01
60	184.6	0.007
553	461.8	0.007
552	461.8	0.007
86	369.4	0.007
66	290.8	0.007
87	184.6	0.007
64	461.8	0.007
62	230.8	0.007
85	184.6	0.007
51	115.4	0.007
52	115.4	0.007
541	115.4	0.007
54	184.6	0.007
67	369.4	0.007
531	461.8	0.007
53	900	0.01
55	900	0.01
68	290.8	0.007
65	147.6	0.007
63	230.8	0.007
681	230.8	0.007
1000	700	0.01
69	369.4	0.007
73	369.4	0.007
74	369.4	0.007
80	290.8	0.007
79	461.8	0.007
78	461.8	0.007
76	369.4	0.007
72	369.4	0.007
71	461.8	0.007
70	461.8	0.007
77	461.8	0.007
75	461.8	0.007
999	1400	0.01

## **ANEXO 4**

Tabla 23. Ejemplo de balance de caudal para calcular la demanda.

NODO FINAL	NODO INICIAL	Q_entra (l/s)	Q_sale (l/s)	DEMANDA
201	0	288.55	288.55	0
12	11	20	0	20
23	205	170.94	160.94	10
210	27	40	40	0
29	210	20	0	20
28	210	20	0	20
21	20	20	0	20
20	206	40	20	20
25	209	100	80	20
209	24	153.7	212.54	-58.84
26	25	80	60	20
27	26	60	40	20
19	206	60	40	20
18	17	20	0	20
24	23	160.94	153.7	7.24
204	203	288.55	288.55	0
203	202	288.55	288.55	0
14	13	110.27	100	10.27
207	5	100	100	0
7	6	100	100	0
6	207	100	100	0
11	208	40	20	20
10	208	20	0	20
15	14	100	100	0
208	9	60	60	0
9	8	80	60	20
8	7	100	80	20
5	4	110.51	100	10.51
4	205	176.2	231.33	-55.13
13	4	120.82	110.27	10.55
205	204	288.55	347.14	-58.59
202	201	288.55	288.55	0
36	37	40	20	20
41	213	20	0	20
213	212	60	60	0
212	211	80	80	0
37	211	60	40	20
40	39	20	0	20
39	213	40	20	20
38	212	20	0	20
214	36	20	20	0
35	214	20	0	20

NODO FINAL	NODO INICIAL	Q_entra (l/s)	Q_sale (l/s)	DEMANDA
211	209	112.54	140	-27.46
16	215	20	0	20
215	15	100	120	-20
216	215	100	100	0
217	216	100	100	0
206	217	100	100	0
17	19	40	20	20